

Die elektrische Wellentelegraphie

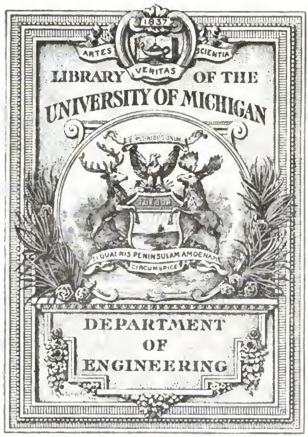
O. Arendt

ANKÜNDIGUNG.

Von unserem Sammelwerke „Telegraphen- und Fernsprech-Technik in Einzeldarstellungen“ folgt nunmehr

No. II der Reihe: „Die elektrische Wellentelegraphie, Einführung in Theorie und Praxis“ von O. Arendt, Telegrapheninspektor in Berlin.

In d ... verflossen sind,
seitdem d ... en ist, daß ohne
eine Drah ... graphiert worden
sei, hat d ... ller Kulturvölker
vermocht, ... unentbehrlichen
Hilfsmitte ... veise wird ange-
nommen, ... en auf Handels-
schiffen b ... uf Kriegsschiffen
noch größ ... mmen weiter die
fahrbaren ... n Zahl gar nicht
annähern ... an dem Gesamt-
bestande ... h in kräftig auf-
strebende ... der Kreis derer,
die mit ... l Schiffsstationen
praktisch ... dienen, Stationen
leiten ode ...



An d ... raubende Studien
sich über ... hie unterrichten
wollen, w ... bsicht, die Leser
in die T ... ierige Rechnung
so weit e ... se der Apparate
notwendi ... chtungen einiger
Musterstationen recht eingehend bekannt, so daß es jedem möglich sein wird, sich ohne Schwierigkeit auch auf anders eingerichteten Stationen zurechtzufinden.

Bisher erschien von der Sammlung im Dezember 1905: „Maschinen-Telegraphen“ von A. Kratz, Telegrapheningenieur im Reichspostamt.

Braunschweig, im September 1907.

Friedrich Vieweg und Sohn.

TELEGRAPHEN- UND FERNSPRECH-TECHNIK

IN EINZELDARSTELLUNGEN

UNTER MITWIRKUNG ANDERER FACHMÄNNER

HERAUSGEGEBEN

VON

TH. KARRASS

GEH. POSTRAT

OBER-TELEGRAPHENINGENIEUR IM REICHS-POSTAMT

II.

DIE ELEKTRISCHE WELLENTELEGRAPHIE

EINFÜHRUNG IN DIE THEORIE UND PRAXIS

VON

O. ARENDT

MIT 139 ABBILDUNGEN IM TEXT UND AUF EINER TAFEL

BRAUNSCHWEIG

DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN

1907

DIE ELEKTRISCHE
WELLENTELEGRAPHIE

EINFÜHRUNG IN DIE THEORIE UND PRAXIS

VON

O. ARENDT

TELEGRAPHENINSPEKTOR IN BERLIN

MIT 139 ABBILDUNGEN IM TEXT UND AUF EINER TAFEL

BRAUNSCHWEIG

DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN

1907

Published September 20, 1907.

VORWORT.

In der kurzen Zeit von zehn Jahren, die jetzt gerade verflossen sind, seitdem die Welt von der ersten Nachricht überrascht worden ist, daß ohne eine Drahtleitung erfolgreich mittels elektrischer Wellen telegraphiert worden sei, hat die eifrige Arbeit von Ingenieuren und Physikern aller Kulturvölker vermocht, die neue Art der Nachrichtenbeförderung zu einem unentbehrlichen Hilfsmittel für den Weltverkehr auszubilden. Schätzungsweise wird angenommen, daß über 400 Küstenstationen und 250 Stationen auf Handelsschiffen bereits bestehen und daß die Zahl der Stationen auf Kriegsschiffen noch größer ist, als die der anderen zusammen. Dazu kommen weiter die fahrbaren und tragbaren Stationen der Landtruppen, deren Zahl gar nicht annähernd angegeben werden kann. Der Anteil Deutschlands an dem Gesamtbestande dieser Stationen, der nicht gering ist, wächst rasch in kräftig aufstrebender Entwickelung. Damit erweitert sich naturgemäß der Kreis derer, die mit dem Betriebe militärischer und anderer Land- und Schiffsstationen praktisch Befassung haben, sei es, daß sie Apparate selbst bedienen, Stationen leiten oder die Aufsicht darüber führen.

An diese Kreise und nicht minder an Alle, die ohne zeitraubende Studien sich über das Wesentliche der elektrischen Wellentelegraphie unterrichten wollen, wendet sich das vorliegende Buch. Es verfolgt die Absicht, die Leser in die Theorie der elektrischen Schwingungen ohne schwierige Rechnung so weit einzuführen, als zum Verständnis der Wirkungsweise der Apparate notwendig ist, und macht sie mit den technischen Einrichtungen einiger Musterstationen eingehend bekannt, so daß es jedem möglich sein wird, sich ohne Schwierigkeit auch auf anders eingerichteten Stationen zurechtzufinden.

Neben den Benennungen „Funkentelegraphie“, „Drahtlose Telegraphie“ oder „Telegraphie ohne Draht“ für das hier behandelte Telegraphierverfahren wird die Bezeichnung „Wellentelegraphie“ angewendet. Von dem Namen „Radiotelegraphie“, den die Internationale Konferenz für Funkentelegraphie zu Berlin im Oktober 1906 gewählt hat, wird im allgemeinen noch wenig Gebrauch gemacht. Ich habe mich für „Wellentelegraphie“ entschieden, weil mir gerade in dieser

Bezeichnung das Charakteristische der neuen Art der Nachrichtenbeförderung treffend ausgedrückt zu sein scheint.

Herr Dr. G. Seibt hat mir in freundlicher Weise das Material zur Verfügung gestellt, das er zu den Vorträgen gesammelt hat, welche im Auftrage des Reichspostamts von ihm vor Beamten der Telegraphenverwaltung im Winter 1905/06 gehalten worden sind. Die Gesellschaft für drahtlose Telegraphie und die A.-G. C. Lorenz in Berlin haben mich sehr entgegenkommend durch die Überlassung von Zeichnungen, Photographien und Konstruktionsangaben unterstützt. Allen Genannten spreche ich an dieser Stelle meinen verbindlichen Dank aus. Ebenso danke ich der Verlagsbuchhandlung für die gefällige Ausstattung des Buches und die sorgfältige Ausführung der Figuren.

Berlin, im September 1907.

O. Arendt.

INHALTSVERZEICHNIS.

Erster Teil.

Die physikalischen Grundlagen der elektrischen Wellentelegraphie.

Zweiter Teil.

Betriebseinrichtungen für elektrische Wellentelegraphie.

Erster Teil.

Die physikalischen Grundlagen der elektrischen Wellentelegraphie.

I. Einleitung.

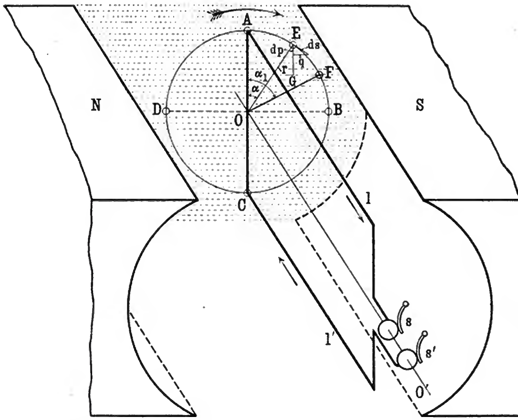
Die „elektrische Wellentelegraphie" ermöglicht den Austausch von Nachrichten zwischen entfernten Orten, ohne daß man zusammenhängender Verbindungsdrähte zur Fortleitung der elektrischen Wellen bedarf; sie wird daher auch „Telegraphie ohne Draht" oder „drahtlose Telegraphie" genannt. Zur Übermittelung der Zeichen dienen die elektromagnetischen Schwingungen, dem Wesen nach Wechselströme, deren Wirkungen sich im Weltenäther als elektrische Wellen nach allen Seiten des Raumes ausbreiten. Wechselströme nennt man solche Ströme, die ihre Richtung und Stärke nach einer bestimmten Gesetzmäßigkeit periodisch ändern. Auch bei der Telegraphie mit fortlaufender Drahtleitung und besonders bei der Telephonie kommen Wechselströme vor. Von diesen unterscheiden sich jedoch die im Dienste der drahtlosen Telegraphie stehenden Schwingungen durch die Häufigkeit, mit der sich die Richtungswechsel des Stromes in der Zeiteinheit vollziehen. Die Wechselzahl des von den gebräuchlichen Dynamomaschinen gelieferten, des sogenannten technischen Wechselstromes beträgt 50 oder 100 in der Sekunde, diejenige der Fernsprechströme mehrere Tausend; die Wellen der drahtlosen Telegraphie erreichen dagegen mehrere hunderttausend bis zu mehreren Millionen Wechsel in einer Sekunde. Sie heißen deshalb „schnelle" Schwingungen, während man im Gegensatz zu ihnen die ersterwähnten Ströme „langsame" Schwingungen nennt. Die Gesetze, denen die schnellen Schwingungen unterliegen, sind im wesentlichen dieselben, welche das Verhalten des technischen Wechselstromes bestimmen. Soweit es für das Verständnis der Vorgänge in der elektrischen Wellentelegraphie notwendig ist, wollen wir uns daher zunächst mit der Erzeugung und den Eigenschaften von Wechselstrom überhaupt befassen.

II. Erzeugung von Wechselstrom.

Erzeugung einer elektromotorischen Kraft durch die Bewegung eines Leiters im magnetischen Felde. Das dem Bau von Wechselstrommaschinen zugrunde liegende Prinzip ist aus Fig. 1 zu erkennen. In einem zeitlich unveränderlichen, gleichförmigen magnetischen Felde NS dreht sich eine Drahtschleife ll' mit gleichbleibender Geschwindigkeit. Der ganze

Raum zwischen den Magnetpolschuhen N und S ist mit magnetischen Kraftlinien angefüllt zu denken, wie sie in der Abbildung nur für die hintere Begrenzungsebene angedeutet sind. Wenn die der Drehungsachse $O—O'$ parallelen Leiterteile l und l' die magnetischen Kraftlinien schneiden, entsteht in den Leitern eine elektromotorische Kraft (EMK), deren Größe an den Schleifringen s und s' gemessen werden kann. Die Richtung dieser EMK läßt sich nach der Dreifingerregel[1]) ermitteln. Die Größe der in einem Leiter von gegebenen Abmessungen induzierten EMK ist abhängig von der Stärke des Magnetfeldes $\mathfrak{H}$, oder von der magnetischen Induktion $\mathfrak{B}$ (Anzahl der von der Feldstärke $\mathfrak{H}$ induzierten Kraftlinien) und von der Geschwindigkeit des Leiters. $\mathfrak{B}$ ist für Luft gleich $\mathfrak{H}$. Da die magnetische Induktion $\mathfrak{B}$

Fig. 1.



durch die auf eine Flächeneinheit entfallende Anzahl von rechtwinklig (normal) zu dieser Fläche verlaufenden Kraftlinien bestimmt wird, so ist die im Leiter bei seiner Bewegung durch eine gegebene Fläche des Kraftfeldes entstehende EMK direkt proportional der Zahl der auf diesem Wege geschnittenen Kraftlinien und umgekehrt proportional der für diesen Weg gebrauchten Zeit. Sie wird daher ausgedrückt durch den Quotienten aus einer Kraftlinienzahl und der zugehörigen Zeitdauer.

---

[1]) Dreifingerregel: Aus dem Daumen, dem Zeigefinger und dem Mittelfinger der rechten Hand bilde man ein dreiachsiges Koordinatensystem, indem man z. B. den Zeigefinger gerade aufrecht streckt, den Daumen auf sich zu richtet und mit dem Mittelfinger horizontal nach der Seite weist. Wendet man dann die Hand so, daß der Daumen in die Richtung der Bewegung des Leiters und der Zeigefinger in die Richtung der magnetischen Kraftlinien weist, so gibt der Mittelfinger die Richtung der induzierten EMK an. Als die Richtung der magnetischen Kraftlinien ist hierbei die Richtung vom Nord- zum Südpol zu betrachten.

Teilen wir die Zeit, welche der Draht für eine ganze Umdrehung gebraucht, in eine sehr große Anzahl gleicher Teile dt, von denen jeder also sehr klein, fast unendlich klein sein wird, und bezeichnen wir ferner mit dN diejenige Anzahl von Kraftlinien, welche das Leiterstück l in der sehr kleinen Zeit dt schneidet, dann ist die während des Zeitteils dt in l erzeugte EMK

$$E = \frac{dN}{dt} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad [1]$$

Stellt nun der um O geschlagene Kreis die Bahn des Leiters dar, so legt dieser bei gleichförmiger Bewegung in jedem Zeitteilchen dt die gleiche Weglänge auf jenem Kreise zurück. Teilen wir dementsprechend den Kreisumfang in viele gleiche Teile, z. B. AE, EF, FB usw., so ist ersichtlich, daß in der Nähe der Punkte A und C auf einen Kreisteil viel weniger Kraftlinien entfallen, als in der Nähe der Punkte B und D.

Die Größe dN und daher die EMK kann also nicht zu jeder Zeit denselben Wert haben. Bei A und C schneidet der Leiter keine Kraftlinien, denn sein Weg verläuft ihnen parallel. Hier ist die EMK daher gleich Null. Bei B und D, wo die Kraftlinien senkrecht getroffen werden, ist die Zahl der vom Leiter geschnittenen Kraftlinien, also auch die EMK, am größten. Die Richtung der EMK ist bei B entgegengesetzt der bei D, denn wenden wir auf diese beiden Punkte die Dreifingerregel an, so haben wir z. B. für B den Daumen der rechten Hand (Bewegungsrichtung des Leiters) nach unten, den Zeigefinger (Kraftlinienrichtung) nach rechts auszustrecken. Dann weist der senkrecht zu beiden stehende Mittelfinger (Richtung der EMK) nach vorn. Bei D bleibt die Richtung des Zeigefingers dieselbe; der Daumen weist jedoch nach oben und daher der Mittelfinger nach hinten. Dieser Richtungswechsel der EMK vollzieht sich in den Punkten A und C, denn hier ändert sich die Richtung, in welcher die Kraftlinien getroffen werden. Während sich der Leiter auf dem Wege von A über B nach C von oben nach unten bewegt, steigt er von C über D nach A von unten nach oben. Da die EMK in dieser Weise ihre Richtung und Größe fortwährend wechselt, wird sie eine Wechselspannung genannt.

Der Verlauf der Wechselspannung nach dem Sinusgesetz. Um das Gesetz zu finden, nach dem sich die EMK in der Drahtschleife ändert, betrachten wir die zur Drehungsachse senkrechte Ebene des um O geschlagenen Kreises. Da das magnetische Feld zwischen N und S nach unserer Annahme gleichförmig ist, so entfallen auf jede Längeneinheit des Durchmessers AC gleich viele Kraftlinien. Für das in die Ebene des Kreises fallende Stück des Leiters l ist demnach, wenn es sich auf der Kreisbahn von E bis F um den Weg s bewegt hat, die Zahl der geschnittenen Kraftlinien dem senkrechten Abstande EG der durch E und F gehenden Kraftlinien proportional. Kürzen wir nun den Zeitraum, für welchen wir die Bahn jenes Leiterstückes betrachten, immer mehr, so wird auch der in dieser Zeit durchlaufene Weg immer kleiner. Dieser Weg ist, wenn wir nur die sehr kurze Zeit dt in Betracht ziehen, während welcher das Leiterstück seine Bahn beim Punkte E durchläuft, so kurz, daß wir ihn statt als Kreisbogen als gerade Linie, und zwar als den Ansatz der bei E an den Kreis

gezogenen Tangente auffassen können. Wir nennen dieses kurze gerade Wegstück ds. Der senkrechte Abstand der durch die Endpunkte des Weges ds gehenden Kraftlinien, welcher die Zahl der vom Leiter in der Ebene des betrachteten Kreises während der Zeit dt geschnittenen Kraftlinien angibt, ist jetzt auf die sehr kleine Strecke dp verkürzt. Verbinden wir die Endpunkte von ds und dp durch die Linie q, so erhalten wir ein rechtwinkliges Dreieck, in welchem der Winkel zwischen ds und q dem Winkel AOE, also dem Winkel gleich ist, um welchen sich der Leiter von seiner Anfangslage im Punkte A auf der Kreisbahn bis zum Punkte E bewegt hat. Bezeichnen wir den Winkel AOE mit α, so ist

$$dp = ds \cdot \sin\alpha \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad [2]$$

Diese Betrachtung gilt für jeden Punkt des Kreisumfanges. Weil wir angenommen haben, daß der Leiter mit unveränderlicher Geschwindigkeit kreisen soll, behält ds stets denselben Wert. Die Größe $\sin\alpha$ ändert sich dagegen bei der fortschreitenden Bewegung ständig, denn α durchläuft mit der Weiterdrehung des Leiters alle Werte von 0^0 bis 360^0; dp ändert seinen Wert daher in derselben Weise wie $\sin\alpha$. Da nun dp das Maß für die Zahl der in jedem Augenblick vom Leiter geschnittenen Kraftlinien, mithin auch für die in jedem Augenblick darin herrschende EMK ist, so erkennen wir, daß sich auch die EMK in gleichem Sinne wie $\sin\alpha$ ändert. Um diese Betrachtung, die nur für das kleine, in die Ebene des um O geschlagenen Kreises fallende Stück des Leiters angestellt worden ist, auf den ganzen Leiter l auszudehnen, müssen wir uns an die untersuchte Ebene immer mehr parallele Ebenen angeschichtet denken, bis der Raum längs der Achse OO' ganz damit ausgefüllt ist. Da die gefundene Beziehung für jede dieser Ebenen gilt, so gilt sie für jedes kleinste Stückchen des Leiters, folglich auch für den ganzen Leiter oder die Länge des Drahtes l.

Bezeichnen wir nun die Gesamtheit der den Wert der EMK beeinflussenden Größen, welche unverändert bleiben, weil sie von der Lage des Drahtes l auf seiner Bahn unabhängig sind, also die Stärke des magnetischen Feldes, die Länge des Drahtes und seine Geschwindigkeit durch den Buchstaben C, so können wir die in dem Drahte l erzeugte EMK durch die Gleichung ausdrücken

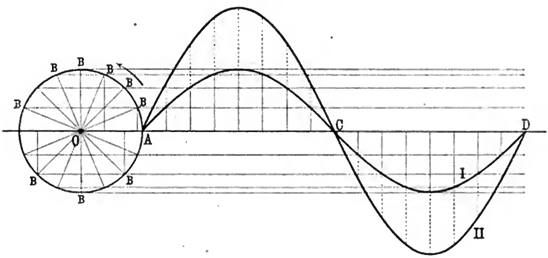
$$E = C \cdot \sin\alpha \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad [3]$$

Die Änderung der EMK während einer Umdrehung der Drahtschleife erfolgt somit nach demselben Gesetz, welchem die Änderung des Wertes der Sinusfunktion unterliegt. Wie die Sinusfunktion sich ändert, erkennen wir, wenn wir einen Winkel, dessen Scheitel der Punkt O in Fig. 2 ist, und dessen beide Schenkel in der Richtung OA zunächst zusammenfallen, allmählich wachsen lassen, indem der eine Schenkel OA fest liegen bleibt, der andere, OB, sich um O in der Richtung des Pfeiles dreht. Setzen wir die Länge des Schenkels OB gleich Eins, so beschreibt der Endpunkt B den sogenannten Einheitskreis. In jeder Lage von OB stellt die von B auf OA gefällte Senkrechte den Wert des Sinus dar, während die Länge des Kreisbogens von A aus gemessen den Maßstab für die Größe des Winkels gibt. Tragen wir für alle Stellungen von OB, wie es für eine beschränkte Anzahl in der Figur geschehen ist, die Bogenlänge AB als Abszisse und die Größe des

Sinus als Ordinate in ein rechtwinkliges Koordinatensystem ein, und verbinden wir die Endpunkte der Ordinaten, so erhalten wir für den Verlauf der Sinuswerte die in Fig. 2 gegebene Kurve I, die Sinuslinie. Wählen wir für C den Wert 2 und multiplizieren wir, der Forderung der Gleichung [3] entsprechend, jede Ordinate der Kurve I in unserer Zeichnung mit 2, so ergibt sich der in der Kurve II dargestellte Verlauf der EMK E.

Jede derartig verlaufende EMK heißt sinusförmig. Auch die Kurve II ist ebenso wie die Kurve I eine Sinuslinie. Die EMK steigt von Null aus — erst schnell, dann langsam — zu einem Höchstwerte, fällt — zunächst langsam, dann schnell — wieder ab, geht durch Null hindurch, erreicht in derselben Weise einen Höchstwert entgegengesetzter Richtung, von dem aus sie sich wieder zu Null vermindert, um dann denselben Verlauf von neuem zu beginnen. Der Höchstwert wird erreicht, wenn α gleich 90^0 oder gleich 270^0 ist; dann ist $\sin\alpha$ gleich dem Radius des Einheitskreises und zwar entweder gleich $+1$ oder -1. Für α gleich 90^0 ergibt sich daher aus Gleichung [3]

Fig. 2.



wenn wir den Höchstwert von E mit E_{max} bezeichnen, $E_{max} = C$. Um anzudeuten, daß durch die Größe von α der Wert der EMK für einen ganz bestimmten Augenblick festgelegt wird, bezeichnen wir diesen Augenblicks- oder Momentanwert durch E_{mom} und erhalten dann die Beziehung

$$E_{mom} = E_{max} \cdot \sin\alpha \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad [4]$$

Berechnung des Höchstwertes der Wechelspannung. Den Wert von E_{max} finden wir, wenn wir die Gleichung [1] auf denjenigen kurzen Zeitabschnitt dt anwenden, in welchem E den Höchstwert erreicht, d. h. wenn $\alpha = 90^0$ ist, oder wenn der Leiter l den Punkt B (Fig. 1 auf S. 2) durchläuft. Die in dieser Zeit dt geschnittene Kraftlinienzahl wird bei gegebener Geschwindigkeit durch die magnetische Feldstärke bestimmt.

Bezeichnen wir die Zahl der magnetischen Kraftlinien zwischen den beiden Polen mit N und legen wir senkrecht zu den Kraftlinien eine Ebene durch das Magnetfeld, so entfallen, da das Feld gleichförmig ist, auf jedes Quadratzentimeter dieser Ebene gleich viel Kraftlinien. Enthält nun der im Bereich des Kraftfeldes liegende Teil dieser Ebene q Quadratzentimeter, so ist die auf

1 qcm entfallende Kraftlinienzahl gleich $\frac{N}{q}\cdot$ Diese Zahl wird die magnetische Dichte oder Induktion genannt und mit $\mathfrak{B}$ bezeichnet. Demnach ist

$$\mathfrak{B} = N/q \quad \ldots \ldots \ldots \quad [5]$$

und daher auch

$$N = \mathfrak{B} q \quad \ldots \ldots \ldots \quad [6]$$

d. h. die Zahl der auf eine Fläche entfallenden Kraftlinien ist bei gegebener Feldstärke als das Produkt aus der Induktion und der senkrecht zu den Kraftlinien stehenden Fläche zu finden. Da nun der Leiter im Augenblick seines Durchganges durch den Punkt B die Kraftlinien senkrecht trifft, so ergibt sich die Anzahl der in diesem kurzen Zeitteil dt geschnittenen Kraftlinien dN als das Produkt aus $\mathfrak{B}$ und der vom Leiter in der Zeit dt bestrichenen Fläche. Diese ist gleich dem Produkt aus seiner Länge l und dem zurückgelegten Wege ds, mithin gleich $l.ds$. Dreht sich die Drahtschleife in einer Sekunde n mal um, so durchmißt der Draht l in einer Sekunde n mal die $2r\pi$ lange Kreisbahn, d. h. er macht den Weg $n.2r\pi$; in dt Sekunden wird demnach von dem Draht l ein Weg

$$ds = n.2r\pi.dt$$

zurückgelegt. Die vom Leiter l beim Durchgang durch den Punkt B senkrecht zu den Kraftlinien bestrichene Fläche ist also

$$l.ds = l.n.2r\pi.dt.$$

Mithin ist die Zahl der in dieser Zeit geschnittenen Kraftlinien

$$dN = \mathfrak{B}.l.n.2r\pi.dt.$$

Dieser Wert, in die auf den Punkt B (Fig. 1) bezogene Gleichung [1] eingesetzt, ergibt

$$E_{max} = \mathfrak{B}.l.n.2r\pi \quad \ldots \ldots \ldots \quad [5a]$$

Es ist aber $l.2r$ die von dem Durchmesser AC und l begrenzte Fläche; $\mathfrak{B}.l.2r$ ist daher die Höchstzahl der Kraftlinien, welche die Drahtschleife zu umschließen vermag. Sie braucht mit der Zahl der zwischen den Magnetpolen verlaufenden Kraftlinien nicht übereinzustimmen. Verstehen wir jetzt unter N die Zahl der Kraftlinien, welche die Drahtschleife höchstens umschließen kann, so läßt sich N für $\mathfrak{B}.l.2r$ setzen; wir erhalten

$$E_{max} = \pi.n.N \quad \ldots \ldots \ldots \quad [6a]$$

Eine genau ebenso große EMK wie in dem Leiterteil l wird auch im Leiterteil l' erzeugt; da sich beide, wie die Dreifingerregel ergibt, in ihrer Wirkung addieren, so ist der Gesamtwert

$$E_{max} = 2\pi.n.N \quad \ldots \ldots \ldots \quad [7]$$

Der hieraus berechnete Wert der EMK ist in Einheiten des absoluten Maßsystems ausgedrückt. Da nun 10^8 absolute Einheiten gleich 1 Volt sind, so ist

$$E_{max} = 2\pi.n.N.10^{-8}\,\text{Volt} \quad \ldots \ldots \ldots \quad [8]$$

und nach Gleichung [4]

$$E_{mom} = 2\pi.n.N.\sin\alpha.10^{-8}\,\text{Volt} \quad \ldots \ldots \ldots \quad [9]$$

Periode, Frequenz, Phase. Von den Größen auf der rechten Seite der Gleichung [9] ist 2π eine feststehende Zahl. Die Umdrehungszahl n

der Drahtschleife und die von der Drahtschleife umschlossene Höchstzahl N von Kraftlinien stehen ebenfalls fest; sie können gemessen werden. Veränderlich oder unbestimmt ist zunächst noch die Größe $\sin \alpha$. Mit α wurde der Winkel bezeichnet, um den sich die Drahtschleife nach einer gewissen Zeit t aus der Ruhelage gedreht hat. Da sich nun die Schleife, wie wir angenommen haben, in einer Sekunde n mal umdreht, so legt sie in dieser Zeit den einem Winkel von n mal 360^0 oder $n \,.\, 2\pi$ entsprechenden Weg zurück. Nennen wir diesen Winkel ω, so ist

$$\omega = n \,.\, 2\pi \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad [10]$$

ω heißt die Winkelgeschwindigkeit der rotierenden Drahtschleife; sie stellt den in einer Sekunde von der Drahtschleife zurückgelegten Winkel dar. Daher ist der in der Zeit t zurückgelegte Winkel α gleich ωt. Folglich wird die in jedem Augenblick in dem Draht erzeugte EMK auch durch die Gleichungen

$$E_{mom} = E_{max} \,.\, \sin (n\, 2\pi t) \quad \ldots\ldots \quad [11]$$

und

$$E_{mom} = E_{max} \,.\, \sin (\omega t) \quad \ldots\ldots \quad [12]$$

bestimmt.

Die Zeit, welche die EMK gebraucht, um alle Werte von Null durch das positive Maximum, wieder durch Null und weiter durch das negative Maximum zu Null zurück zu durchlaufen, heißt eine Periode; sie wird mit T bezeichnet. In Fig. 2 (a. S. 5) reicht eine Periode von A bis D. Die Anzahl der Perioden in einer Sekunde heißt die Periodenzahl oder die Frequenz des Wechselstromes, die wir mit ν bezeichnen. Es ist also

$$T = \frac{1}{\nu} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad [13]$$

und

$$\nu = \frac{1}{T} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad [14]$$

Für den bisher betrachteten Fall der Stromerzeugung mittels eines Polpaares entspricht eine Periode immer einer Umdrehung der Drahtschleife; ν ist also gleich n und daher für diesen Fall

$$E_{mom} = E_{max} \sin (2\pi\nu t) \,.\quad \ldots\ldots\ldots \quad [15]$$

Häufig werden jedoch die Wechselstrommaschinen mit mehr als einem Polpaar gebaut, so daß sich die an der Hand der Fig. 1 (S. 2) betrachteten Vorgänge während einer Umdrehung mehrmals abspielen. Die EMK durchwandert dann während einer Umdrehung mehrere Perioden, so daß ν nicht mehr gleich n ist. Auf die Größe von $\sin (2\pi\nu t)$ hat es jedoch keinen Einfluß, wenn ν ein Vielfaches von n wird; die Gleichung [15] behält vielmehr allgemein ihre Gültigkeit. Sie ergibt dieselbe Grundform der Kurve, wie sie in Fig. 2 aus der Gleichung [3] konstruiert worden ist. Die für die periodische Änderung der EMK maßgebende Größe ist jedoch nicht mehr ein Winkel, sondern die Zeit t; die EMK ist also jetzt als eine Funktion der Zeit bestimmt. Der Ausdruck $2\pi\nu$ bedeutet hierbei die Geschwindigkeit, mit welcher die EMK in einer Periode die einzelnen Werte durchläuft. Durch Einsetzen eines bestimmten Wertes für t läßt sich die Größe von E_{mom} für jeden Zeitpunkt ermitteln. Besitzt die Wechselspannung z. B. die Perioden-

zahl 50, so dauert eine Periode $\frac{1}{50}$ Sekunde. Will man nun wissen, wie groß E am Ende der ersten Periode ist, so ist $t = \frac{1}{50}$ zu setzen. Dann ergibt sich aus Gleichung [15] der gesuchte Wert $= E_{max} \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \frac{1}{50}\right) = E_{max} \cdot \sin 2\pi$. Da nun $\sin 2\pi = 0$ ist, wird der gesuchte Wert $= 0$.

Oder ist der Wert von E nach $^1/_4$ Periode zu suchen, so erhält man $E_{mom} = E_{max} \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \frac{1}{4 \cdot 50}\right) = E_{max} \cdot \sin\frac{\pi}{2} = E_{max}$, da $\sin\frac{\pi}{2} = 1$ ist. Ebenso lassen sich für jede beliebige Zeit t die Werte für E_{mom} ausrechnen.

Die Zeit t spielt eine wichtige Rolle bei der Vergleichung von Wechselspannungen und Wechselströmen. Zwei unabhängig voneinander erregte elektromotorische Kräfte von gleicher Periodenzahl seien gegeben durch die Gleichungen

$$E_{mom} = E_{max} \sin(2\pi\nu t)$$

und

$$E'_{mom} = E'_{max} \sin(2\pi\nu t').$$

Ist nun t immer gleich t', so durchlaufen die beiden elektromotorischen Kräfte (EMKe) die Periode vollkommen gleichzeitig: sie verlassen gleichzeitig den Nullwert, erreichen gleichzeitig die Höchstwerte und kehren gleichzeitig zu Null zurück. Man sagt: sie befinden sich in gleicher Phase. Hat aber t' einen von t verschiedenen Wert, so sind die EMKe gegeneinander in der Phase um die Zeit $t - t'$ verschoben; wird t' größer als t, so durcheilt E' die einzelnen Werte der Periode früher als E; wird dagegen t' kleiner als t, so bleibt E' hinter E zurück.

Bieten wir einer Wechselspannung einen leitenden Weg dar, so entsteht ein Strom J, dessen Wert sich ebenso wie derjenige der EMK periodisch nach dem Sinusgesetz ändert.

Für den Wechselstrom gilt, der Gleichung [15] analog, die Beziehung

$$J_{mom} = J_{max} \sin(2\pi\nu t) \quad \ldots\ldots\ldots \quad [16]$$

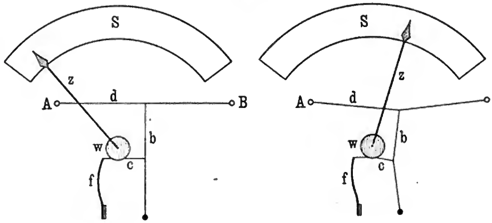
III. Wechselstrommessungen.

Weicheiseninstrumente. Die Ablenkung einer Magnetnadel durch den Strom oder die Ablenkung einer stromdurchflossenen Spule durch einen Dauermagneten können zum Messen von Wechselströmen nicht benutzt werden, weil die Einwirkung der positiven Stromteile auf das Magnetfeld durch die der unmittelbar folgenden negativen Stromteile aufgehoben wird. Um derartige Instrumente für Wechselstrommessungen brauchbar zu machen, müssen die Dauermagnete durch Elektromagnete ersetzt und diese von dem zu messenden Wechselstrom selbst erregt werden, so daß auch das feststehende Magnetfeld stets gleichzeitig mit dem Strom seine Polarität ändert. Die so eingerichteten Meßgeräte werden als Weicheiseninstrumente bezeichnet. Außer ihnen sind noch Dynamometer- und Hitzdrahtinstrumente zum Messen von Wechselströmen geeignet und hauptsächlich im Gebrauch.

Meßinstrumente nach dem Dynamometerprinzip. Die Wirkung der Dynamometer beruht auf der Anziehung und Abstoßung paralleler gleich oder entgegengesetzt gerichteter Ströme. Eine vom Wechselstrom durchflossene feste Spule wirkt auf eine von demselben Strom durchflossene bewegliche Spule und sucht diese so zu drehen, daß in beiden der Strom jederzeit parallel und gleichgerichtet verläuft.

Hitzdrahtinstrumente. Bei den Hitzdrahtinstrumenten wird die Erwärmung eines Leiters, des „Hitzdrahtes", durch den Strom für die Messung

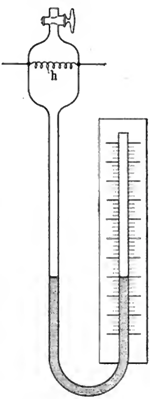
Fig. 3.



a. b.

benutzt. Die Einrichtung einer Art solcher Hitzdrahtinstrumente ist in Fig. 3 dargestellt. Auf den bei *A* und *B* fest eingespannten Draht *d* wirkt ein dauernder Zug, der von der Feder *f* ausgeübt und durch den um die Rolle *w* gewundenen Faden *c* auf den Draht *b* und von diesem auf den Draht *d* übertragen wird. Infolge der Erwärmung durch den Strom dehnt sich der Draht *d* aus und gibt dem Zuge der Feder *f* nach. Hierbei wird die Rolle *w* gedreht und mit ihr der Zeiger *z* bewegt. Die Teilung der Skala *S* wird durch eine Eichung, z. B. mittels Gleichstroms, bestimmt.

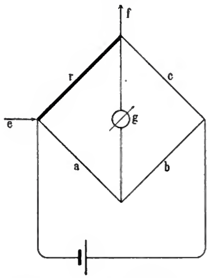
Fig. 4.



In anderer Weise wird die Erwärmung des Hitzdrahtes bei den Luftthermometern zur Bestimmung eines Stromes benutzt. Wie in Fig. 4 gezeigt, wird der Hitzdraht *h* in ein durch einen Hahn verschließbares Glasgefäß geführt, das in eine U-förmig gebogene Röhre ausläuft. Die Röhre ist mit einer gefärbten Flüssigkeit gefüllt. Erwärmt sich der Hitzdraht, so wird auch die ihn umgebende Luft in dem Gefäße warm, sie dehnt sich aus und drückt, wenn der Hahn geschlossen ist, auf die Flüssigkeit, so daß diese in dem anderen Schenkel der Röhre in die Höhe steigen muß. Aus dem Stande der Flüssigkeitssäule, der an einer Skala abgelesen wird, kann man auf die Stärke des Stromes schließen. Ein solches Meßgerät ist das Rießsche Luftthermometer. Wir werden ihm in seiner Verwendung für besondere Zwecke der drahtlosen Telegraphie später wieder begegnen.

Bolometer. Drähte von hohem Temperaturkoeffizienten, z. B. eiserne Drähte, ändern mit der Erwärmung ihren Widerstand sehr merklich. Wird ein solcher Draht *r*, wie in Fig. 5 angegeben ist, als ein Brückenarm in ein Wheatstonesches Viereck eingeschaltet, dessen übrige Arme *a*, *b* und *c* so abgeglichen sind, daß durch die Galvanometerdiagonale kein Strom aus der Batterie fließt, so wird das Gleichgewicht dieser Brückenanordnung gestört, sobald der Draht *r* durch den Strom, der gemessen werden soll, erwärmt wird. Das Galvanometer *g* zeigt dann einen Ausschlag. Auch mit dieser Einrichtung lassen sich Wechselströme nachweisen und messen. Der zu messende Strom wird bei *e* ein- und bei *f* weiter geleitet. Indem er den Draht *r* erwärmt, verursacht er einen Ausschlag des Galvanometers. Apparate dieser Art, Bolometer genannt, gestatten genaue Eichung und sind bei Verwendung geeigneter Galvanometer sehr empfindlich. Sie leisten für die Untersuchung elektromagnetischer Schwingungen gute Dienste.

Fig. 5.



Höchstwert, Mittelwert. Die aufgeführten Instrumente werden sowohl von der positiven wie von der negativen Hälfte des Wechselstromes in demselben Sinne beeinflußt. Die periodischen Schwankungen in der Stromstärke wechseln jedoch zu schnell, als daß die beweglichen Teile ihnen folgen könnten. Die Zeiger der Instrumente stellen sich vielmehr dauernd auf einen Ausschlag ein, der einem mittleren Werte aus allen von der Stromstärke innerhalb einer halben Periode durchlaufenen Augenblickswerten entspricht. Die Wirkung auf die Instrumente ist der vom Strome geleisteten Arbeit proportional. Diese ist gleich dem Produkt aus der Stromstärke und dem Spannungsabfall im Instrument. Ist R der Widerstand des Instrumentes und J der Mittelwert der Stromstärke, so ist RJ der Spannungsabfall und $J.RJ$ oder J^2R die vom Strome geleistete Arbeit. Die Angaben des Meßinstrumentes sind also dem Quadrate der Stromstärke proportional; maßgebend für den Ausschlag ist daher ein Mittelwert J^2 aus den Quadraten aller Werte, welche der Strom von Null bis zum Höchstwert und zu Null zurück annimmt. Zieht man aus diesem Quadrat die Wurzel, so erhält man die als Mittelwert, auch wirksamer Wert oder Effektivwert bezeichnete Stromstärke J, welche angibt, wie groß ein unveränderlicher Strom sein muß, wenn er dieselbe Arbeit leisten soll wie der Wechselstrom. In der Voraussetzung eines sinusförmigen Verlaufs ergibt die Rechnung folgende Beziehung zwischen Mittel- und Höchstwert:

$$J^2 = \tfrac{1}{2} J_{max}^2 \qquad [17]$$

woraus folgt:

$$J = J_{max} \frac{1}{\sqrt{2}} \qquad [18]$$

[1]

[1]) Wenn der Wechselstrom einen induktionsfreien Widerstand R durchfließt, so erzeugt er Wärme und leistet somit Arbeit. Die während der Dauer einer

Dieselben Beziehungen wie für den Strom gelten für die EMK und die Klemmenspannung. Man unterscheidet hiernach in der Wechselstromtechnik die Augenblickswerte, die Höchstwerte und die wirksamen Werte. Die letzteren sind es, welche von den Meßinstrumenten angezeigt werden und die auch stets gemeint sind, wenn im nachstehenden schlechthin von Wechselspannung oder Wechselstrom gesprochen wird. Da sie uns am häufigsten begegnen, sollen sie ohne Index durch die Buchstaben E und J bezeichnet werden. Die Höchstwerte ergeben sich hieraus durch Multiplikation mit $\sqrt{2}$.

Messen wir mit einem der erwähnten Instrumente eine Wechselspannung, z. B. gleich 200 Volt, so müssen wir unter Umständen berücksichtigen, daß die Höchstwerte der wirklich vorhandenen Spannung $200 \times \sqrt{2} =$ rund 285 Volt betragen.

IV. Selbstinduktion im Wechselstromkreise.

Magnetfeld und Leiter. Jeder vom elektrischen Strom durchflossene Leiter ist von einem magnetischen Kraftfelde umgeben. Nehmen wir an, es

Fig. 6a.

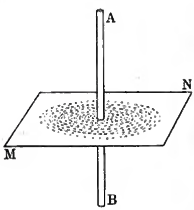
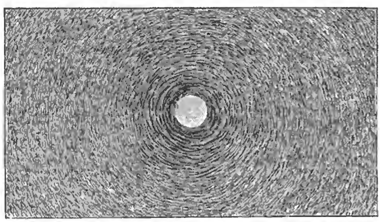


Fig. 6b.



sei durch den Leiter eine senkrecht (normal) zu ihm stehende Ebene gelegt, und denken wir uns alle in dieser Ebene belegenen Stellen des magnetischen Kraftfeldes, welche gleiche Stärke haben, durch Linien miteinander verbunden,

---

ganzen Periode T geleistete Arbeit sei mit A, die während der kleinen Zeit dt geleistete Arbeit mit dA bezeichnet. Dann ist

$$dA = J_{mom}^2 \cdot R \cdot dt,$$

$$J_{mom} = J_{max} \cdot \sin(2\pi\nu t), \text{ nach Gl. [16]},$$

also $$dA = J_{max}^2 \cdot \sin^2(2\pi\nu t) \cdot R \cdot dt.$$

Daher $$A = J_{max}^2 \cdot R \cdot \int_0^T \sin^2(2\pi\nu t)\, dt$$

$$= \frac{1}{2} \cdot J_{max}^2 \cdot R \cdot T.$$

Ein Gleichstrom, welcher die Arbeit A leisten soll, müßte also gleich $\sqrt{\frac{1}{2} J_{max}^2}$ sein, d. h. der wirksame Wert J ist, wie oben erörtert:

$$J = J_{max} \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

so erhalten wir konzentrische Kreise, die den Verlauf der magnetischen Kraftlinien um den Leiter darstellen. Es läßt sich dies veranschaulichen, wenn man ein Kartonblatt auf den Leiter schiebt, wie es in Fig. 6a angedeutet ist. Streut man, während ein kräftiger Strom durch den Leiter $A—B$ geschickt wird, auf den Karton $M—N$ Eisenfeilspäne vorsichtig auf, so ordnen sich diese in konzentrischen Kreisen rings um den Leiter. In Fig. 6b ist das Kartonblatt mit den Feilspänen in Draufsicht dargestellt; den Querschnitt des Leiters sieht man hier als weißen Kreis in der Mitte des Bildes.

Ordnet man eine Magnetnadel so an, daß sich ein Pol derselben kreisförmig um den Leiter bewegen kann, während der andere Pol außerhalb des Bereiches des Stromes bleibt, so wird die Nadel durch die, den Leiter umgebenden magnetischen Wirbel mitgerissen. Ihr Nordpol z. B. kreist, wenn man mit der Stromrichtung längs des Leiters blickt, dauernd in der Richtung des Uhrzeigers auf der Bahn der magnetischen Kraftlinien um den stromführenden Draht.

Das um den Leiter sich bildende Magnetfeld ist, wenn es durch einen unveränderlichen Gleichstrom erzeugt wird, dauernd von unverändert gleicher Stärke und übt daher auf unbewegte, nicht stromdurchflossene elektrische Leiter keinen Einfluß aus. Befinden sich ein solches magnetisches Feld und ein elektrischer Leiter in räumlicher Bewegung zueinander, so daß magnetische Kraftlinien von dem Leiter geschnitten werden, so entsteht in dem Leiter eine EMK, wie wir bei der Erzeugung von Wechselstrom (zu vgl. Fig. 1 a. S. 2) gesehen haben.

Verdankt aber das magnetische Kraftfeld seinen Ursprung einem durch den Leiter fließenden Wechselstrom, so wechselt es periodisch wie dieser seine Stärke und seine Richtung. Das so erregte „Wechselfeld" besitzt in jedem folgenden Zeitteilchen eine andere Stärke als im vorhergehenden. Es unterliegt daher einer Bewegung, die wir zeitliche Bewegung nennen wollen. Wir sagen: Mit dem Fortschreiten der Zeit bewegt sich die Stärke des Magnetfeldes dauernd zwischen zwei Grenzwerten hin und her. Auch diese zeitliche Bewegung des magnetischen Kraftfeldes bringt in einem benachbarten Leiter eine EMK hervor, weil sich die Zahl der den Leiter durchsetzenden Kraftlinien ändert.

In beiden Fällen der Bewegung, der räumlichen und der zeitlichen, wird im Leiter eine EMK induziert. Wird der Leiter zu einem Kreise geschlossen, so erzeugt diese EMK einen Strom.

Gegenseitige Induktion. Führen wir, wie es Fig. 7 zeigt, zwei geschlossene Leiterkreise I und II streckenweise parallel und senden wir durch I einen Gleichstrom, dessen Richtung der gefiederte Pfeil angibt, so entstehen in der Umgebung des Leiters I magnetische Kraftlinien, welche sich nur so lange vermehren, als der Strom seinen unveränderlichen Endwert noch nicht erreicht hat. So lange der Strom anwächst, befindet sich das von ihm hervorgerufene magnetische Feld in zeitlicher Bewegung. Dieses Feld nun umgibt auch den Leiter II. In dem Leiter II wird daher ein Strom induziert, welcher sich an einem eingeschalteten Meßinstrument als kurzer, dem Strom im Leiter I entgegengesetzt gerichteter Stromstoß erkennen läßt, wie der gestrichelte und gefiederte Pfeil zeigt. Der in den Leiter I entsandte Strom heißt der primäre,

der in II induzierte der sekundäre Strom. Der letztere erzeugt um seinen Leiter herum ebenfalls ein magnetisches Kraftfeld, dessen Richtung jedoch der des primären entgegengesetzt ist. Das sekundäre Kraftfeld verzögert das Anwachsen des primären, weil beide zusammenfallen. Wird der Kreis I geöffnet, so verschwinden seine Kraftlinien. Es tritt also wiederum zeitliche Bewegung in dem primären Kraftfelde ein, jedoch in entgegengesetztem Sinne wie beim Entstehen des Stromes. Hierdurch wird im Leiter II ein Strom von der umgekehrten Richtung wie vorher induziert, d. h. ein mit dem im Leiter I verschwindenden gleichgerichteter Strom. Das rings um den Leiter II von dem zweiten Induktionsstrome hervorgerufene sekundäre Kraftfeld ist also dem um den Leiter I verschwindenden primären gleichgerichtet und verlangsamt das Verschwinden des primären Kraftfeldes.

Folgen sich der Schluß und die Unterbrechung des primären Stromes rasch genug, so entsteht im Leiter II ein ununterbrochener Wechselstrom.

In der Umgebung eines von Wechselstrom durchflossenen Leiters herrschen ähnliche Bewegungszustände. Mit dem Strome im Leiter I wächst und fällt unaufhörlich das primäre magnetische Wechselfeld und schwingt zwischen

Fig. 7.

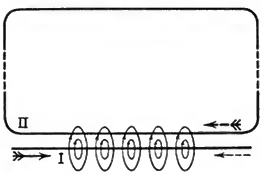
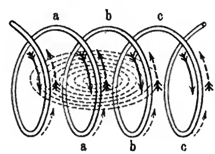


Fig. 8.



positiven und negativen Werten hin und her. In dem Leiter II wird daher in stetigem Wechsel dem in I ansteigenden Strom ein entgegengesetzter, dem in I abfallenden ein gleichgerichteter sekundärer Strom induziert. In diesem Falle ist der Induktionsstrom immer ein Wechselstrom.

Selbstinduktion. Das vom primären Strome erregte magnetische Kraftfeld umschließt nicht nur den Leiter außerhalb wie eine Hülle, sondern die Kraftlinien durchsetzen auch den Leiter selbst. Solange ihre Dichte sich ändert, unterliegt der den Strom führende Leiter selbst ebenso wie ein benachbarter Leiter den Wirkungen des zeitlich bewegten Magnetfeldes. In ihm entsteht ebenfalls durch Induktion eine EMK, nämlich die EMK der Selbstinduktion. Sie ist derjenigen des primären Stromes entgegengesetzt gerichtet und verzögert daher das Anwachsen dieses Stromes. Bei der Stromunterbrechung ist die EMK der Selbstinduktion mit der des erregenden Stromes gleichgerichtet und bestrebt, dessen Dauer zu verlängern. In Fig. 7, in welcher das Ansteigen des primären Stromes versinnlicht ist, wird die Richtung der im Leiter selbst induzierten EMK durch den gestrichelten, nicht gefiederten Pfeil gekennzeichnet.

Wird der stromdurchflossene Leiter zu einer Spule aufgewickelt, so verlaufen, wie vorher die Teile zweier getrennter Stromkreise I und II, jetzt die einzelnen Teile desselben Stromkreises, nämlich die Windungen der Spule,

parallel zueinander. Fig. 8 (a. v. S.) zeigt eine solche Spule. Die dicker gezeichneten Bogen denken wir uns nach vorn heraustretend. Betrachten wir die einzelnen Windungen in ähnlicher Weise wie die beiden Leiter in Fig. 7, indem wir immer zwei benachbarte Leiterteile *aa*, *bb* für sich behandeln, so erkennen wir, daß z. B. der in *bb* entstehende primäre Gleichstrom — durch einen ausgezogenen gefiederten Pfeil gekennzeichnet — eine EMK induziert, und zwar sowohl in den benachbarten Umwindungen *aa* und *cc* — gefiederte gestrichelte Pfeile — als auch in sich selbst — ungefiederter gestrichelter Pfeil. Während des Ansteigens des primären Stromes ist die induzierte EMK ihm entgegengesetzt, während des Abfallens ihm gleichgerichtet. Wie die Windung *bb* auf *aa* und *cc* wirkt, so wirkt auch *aa* auf *bb* und *cc*, *cc* auf *bb* und *aa*, überhaupt jede Windung der ganzen Spule auf die sämtlichen übrigen Windungen — auf die näher gelegenen kräftiger, auf die entfernteren schwächer, denn das z. B. für den Draht *aa* gezeichnete magnetische Kraftfeld durchsetzt, an seiner Peripherie immer schwächer werdend, alle Drahtwindungen der Spule. Alle diese Einzelwirkungen, sowohl die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Windungen untereinander als auch die von jeder Windung in sich selbst erzeugten EMKe, addieren sich zu einer sehr kräftigen Gesamtwirkung, welche dem Ansteigen des Stromes einen Widerstand entgegensetzt und als die elektromotorische Gegenkraft der Selbstinduktion der Spule bezeichnet wird.

Sobald ein Gleichstrom seinen dem Ohmschen Gesetz entsprechenden Endwert erreicht hat, hört die Wirkung der Selbstinduktion auf. Bewegung und damit die Erzeugung einer neuen EMK tritt erst wieder ein, wenn der Strom unterbrochen wird. Die Selbstinduktion erzeugt dann einen dem unterbrochenen gleichgerichteten Strom und dieser ein dem vorhandenen gleichgerichtetes Magnetfeld. Man kann daher die Selbstinduktion mit dem Beharrungsvermögen oder der Trägheit vergleichen und sie als eine Kraft ansehen, welche sich sowohl dem Ansteigen als auch dem Verschwinden des Stromes in der Spule und seines Magnetfeldes, also einer Änderung des vor dem Beginn der Bewegung vorhandenen Zustandes widersetzt.

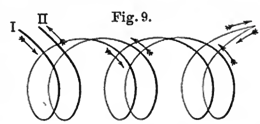
Senden wir Wechselstrom in die Spule, so befindet sich das Magnetfeld in dauernder Bewegung. Es wird daher fortwährend die Gegenkraft der Selbstinduktion erregt, welche, in ihrer Richtung wechselnd, dem Ansteigen und Abfallen des Stromes stets ihren Widerstand entgegensetzt. Die an den Enden der Spule wirkende Wechselspannung hat infolgedessen ihren Höchstwert immer bereits durchlaufen, wenn der durch die Gegenkraft der Selbstinduktion bekämpfte Strom seinen vollen Wert noch längst nicht erreicht hat. So kann der Wechselstrom niemals zu der Stärke ansteigen, welche der gegebenen EMK nach dem Ohmschen Gesetz entsprechen würde. Will man ihn auf dieselbe Höhe bringen, welche ein Gleichstrom von bestimmter EMK in der Spule erreichen kann, so muß man die EMK des Wechselstromes ganz beträchtlich erhöhen. Bei einem Versuch wurde z. B. an eine Rolle von 4200 Windungen aus 0,5 mm starkem Draht von 40 Ohm Widerstand eine gleichbleibende Spannung von 5 Volt gelegt. Es entstand in ihr, dem Ohmschen Gesetz entsprechend, ein Strom von $5:40 = 0{,}125$ Amp. Darauf wurde an dieselbe Spule eine Wechselspannung von derselben Größe gelegt. Die Stärke des Wechselstromes betrug jedoch nur 0,045 Amp. Es

bedurfte der Erhöhung der Wechselspannung auf 17,5 Volt, um einen Wechselstrom von 0,125 Amp. zu erreichen. Die Größe der Selbstinduktion kann wesentlich verstärkt werden, wenn die Spule mit Eisen ausgefüllt und umgeben wird, denn im Eisen erregt der Strom ein weit kräftigeres Magnetfeld als in der Luft. Ein Eisenkern, der in die Spule gesteckt wurde, verminderte, ohne daß an dem Drahtwiderstande des Stromkreises etwas geändert wurde, die Stromstärke auf 0,022 Amp. Um die Stromstärke von 0,125 Amp. wieder herzustellen, war es nötig, die Spannung an den Klemmen auf 102 Volt zu erhöhen. In diesen Wirkungen der Selbstinduktion offenbart sich ein wesentlicher Unterschied zwischen dem Verhalten von Gleichstrom und Wechselstrom in derselben Spule.

Auch in gestreckten Stromleitern verhalten sich Gleich- und Wechselstrom verschieden. Aus Fig. 7 haben wir erkannt, daß jeder Strom im eigenen Leiter eine EMK der Selbstinduktion hervorruft. Diese tritt bei Gleichstrom nur während des Ein- und Ausschaltens, beim Wechselstrom dauernd auf. Die Wirkung ist im gestreckten Leiter aber wesentlich geringer als in einer Spule, weil die Verstärkung durch die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Umwindungen fehlt. Die Selbstinduktion ist in einem geraden Draht so klein, daß für viele technische Zwecke auf einen solchen Leiter auch bei Wechselstrom das Ohmsche Gesetz ohne merklichen Fehler angewendet werden kann. Für die drahtlose Telegraphie fällt indessen auch die geringe Selbstinduktion gestreckter Leiter ins Gewicht.

Bifilare Wickelung. Werden zwei isolierte Drähte parallel zueinander auf einen gemeinschaftlichen Kern so aufgewickelt, daß unmittelbar neben jeder Windung des einen Drahtes eine Windung des zweiten liegt (Fig. 9), und werden die Enden der beiden Wickelungen an einer Seite verbunden, so durchfließt der Strom die eine Wickelung im entgegengesetzten Sinne wie die andere. In der einen von zwei nebeneinander liegenden Windungen hat z. B. der Strom, wie in Fig. 9 durch gefiederte Pfeile angedeutet ist, die Richtung von oben nach unten, in der anderen von unten nach oben. Die nebeneinander liegenden Drähte erzeugen, mögen sie von Gleichstrom oder von Wechselstrom durchflossen werden, gleichzeitig magnetische Felder von stets entgegengesetzter Richtung, die sich in ihrer Wirkung aufheben. Solche bifilar gewickelte Spulen bieten dem technischen Wechselstrom keinen anderen Widerstand dar als gerade gestreckte Drähte derselben Länge. Deshalb werden sie im Gegensatz zu den mit Selbstinduktion behafteten unifilar gewickelten Rollen als induktionsfreie Widerstände bezeichnet.

Fig. 9.



Durch einen Versuch läßt sich zeigen, wie die Selbstinduktion durch Bifilarschaltung vernichtet wird. Werden Anfang und Ende von zwei isolierten, unmittelbar nebeneinander aufgewickelten Drähten in Klemmen befestigt, die mit A_1, E_1 und A_2, E_2 bezeichnet sein mögen, so kann man die beiden Wickelungen beliebig zusammenschalten. Wird das Ende E_1 der einen mit dem Anfange A_2 der anderen Wickelung verbunden, so werden

beide Wickelungen von dem bei A_1 ein- und bei E_2 austretenden Strome hintereinander in demselben Sinne durchflossen; die Spule wirkt also induktiv, wie eine unfilar gewickelte. Verbindet man aber E_1 mit E_2 und führt man den Strom bei A_1 ein und bei A_2 aus, so durchfließt er beide Wickelungen in entgegengesetztem Sinne; die Spule ist jetzt, wie eine bifilar gewickelte, induktionsfrei. Bei der ersten Anordnung wurde in einer Spule mit zwei Wickelungen von je 2100 Umwindungen und 20 Ohm Widerstand mit einer Wechselspannung von 5 Volt ein Strom von nur 0,045 Amp. erzielt. Durch die Bifilarschaltung wurde die Stromstärke jedoch auf 0,125 Amp. erhöht. Sie erreichte also denselben Wert wie bei Gleichstrom von 5 Volt Spannung; hieraus geht hervor, daß die Selbstinduktion vernichtet war.

Selbstinduktionskoeffizient. Berechnung der elektromotorischen Gegenkraft der Selbstinduktion. Die Größe der elektromotorischen Gegenkraft der Selbstinduktion in einer unifilar gewickelten Spule hängt von der Stärke des durch den Strom erzeugten magnetischen Feldes und von der Geschwindigkeit ab, mit welcher sich die Kraftlinienzahl ändert. Ist N diejenige Anzahl magnetischer Kraftlinien, welche der Wechselstrom in einem bestimmten Augenblick erzeugt, so möge mit dN diejenige Menge von Kraftlinien bezeichnet werden, um welche sich das Kraftfeld in der darauf folgenden sehr kurzen Zeit dt ändert. Die mit dieser Veränderung des Kraftfeldes erregte EMK ist dem Zuwachs oder der Verminderung an Kraftlinien dN direkt, der zugehörigen Zeit dt umgekehrt proportional. Es ergibt sich also die Beziehung

$$E_{mom} = \frac{dN}{dt} \quad \text{[19]}$$

Diese Gleichung entspricht genau der Gleichung [1]. Wie dort erfolgen die Änderungen, denen dN mit dem Fortschreiten der Zeit unterworfen ist, auch hier nach dem Sinusgesetz, wenn das Kraftfeld von einem sinusförmigen Strome hervorgerufen ist. Nach Analogie mit der Gleichung [7] erhalten wir daher

$$E_{max} = 2\pi\nu N \quad \text{[20]}$$

Die Zahl, um die sich die Kraftlinien in der Zeiteinheit ändern, hängt indessen nicht von dJ, der in derselben Zeiteinheit erfolgten Zunahme des Stromes, allein ab, sondern auch von den Eigentümlichkeiten der Drahtspule, denn die Stärke des Magnetfeldes wird unter anderem durch die Anwesenheit von Eisen beeinflußt, und die Wirkungen des Stromes auf die benachbarten Windungen ändern sich offenbar mit deren Abstand, Durchmesser und Anzahl. Diese Einflüsse bleiben für Wechselstrom von bestimmter Periodenzahl stets unverändert, so daß wir sie für die Rechnung in einem konstanten Faktor zusammenfassen und dN gleich dJ mal diesem konstanten Faktor setzen können. Dieser Faktor wird der Selbstinduktionskoeffizient der Spule genannt und mit L bezeichnet. Es ist daher

$$dN = L \cdot dJ \quad \text{[21]}$$

und

$$L = \frac{dN}{dJ} \quad \text{[22]}$$

L bestimmt also, um wieviel sich die Zahl der magnetischen Kraftlinien ändert, wenn der Strom um eine Einheit zu- oder abnimmt. Werden nun $dN = L \cdot dJ$ Kraftlinien durch die Stromeinheit dJ erzeugt, so entspricht dem Strom J_{max} eine Kraftlinienzahl $N = L \cdot J_{max}$. Setzen wir diese Werte für dN und N in die Gleichungen [19] und [20] ein, so erhalten wir für die EMK der Selbstinduktion, die wir fortan mit E_S bezeichnen wollen:

$$E_{S\,mom} = L \frac{dJ}{dt} \quad \text{[23]}$$

und

$$E_{S\,max} = 2\pi\nu L \cdot J_{max} \text{ [1]} \quad \text{[24]}$$

Hieraus folgt ferner

$$J_{max} = \frac{E_{S\,max}}{L 2\pi\nu} \quad \text{[24 a]}$$

Die Gegenspannung einer Selbstinduktion wächst also nach der Gleichung [24] mit der Stärke und der Periodenzahl des Stromes.

Phasendifferenz zwischen dem Strom und der Gegenspannung der Selbstinduktion. Die EMK der Selbstinduktion einer eisenfreien Spule ändert ihren Wert mit der sie erzeugenden Stromstärke [2]); sie verläuft also auch sinusförmig und wird durch die Gleichung

$$E_{S\,mom} = E_{S\,max} \cdot \sin(2\pi\nu t) \quad \text{[25]}$$

bestimmt.

Die Zahl der um den Leiter in Kreisbahnen umlaufenden Kraftlinien ändert sich um so lebhafter, je schneller der Strom ansteigt oder abfällt. Am schnellsten geschieht die Änderung da, wo der Strom durch Null hindurchgeht (vgl. Fig. 2, S. 5). In diesem Zeitpunkt ist also die EMK der Selbstinduktion am größten. Wenn dagegen der Strom seinen Höchstwert durchläuft, ist die Änderung in der Zahl der Kraftlinien gleich Null, also auch E_S gleich Null. Die EMK der Selbstinduktion ist also in der Phase immer um eine Viertelperiode gegen den Strom verschoben. Die induzierte EMK ist so gerichtet, daß sie jeder Veränderung des Stromes, durch den sie entsteht, entgegen wirkt. Sie ist daher positiv, solange die Stromstärke sich im negativen Sinne ändert, d. h. während der Strom vom positiven

---

[1])
$$E_{S\,mom} = L \frac{dJ}{dt},$$
$$J_{mom} = J_{max} \sin(2\pi\nu t),$$
$$dJ = J_{max} \cdot 2\pi\nu \cdot \cos(2\pi\nu t) \cdot dt$$
$$= J_{max} 2\pi\nu \cdot \sin\left(2\pi\nu t + \frac{\pi}{2}\right) \cdot dt,$$
$$E_{S\,mom} = L \cdot J_{max} 2\pi\nu \cdot \sin\left(2\pi\nu t + \frac{\pi}{2}\right).$$

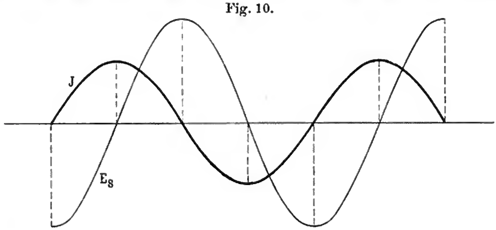
Der Wert auf der rechten Seite erreicht einen Höchstwert, wenn $\sin\left(2\pi\nu t + \frac{\pi}{2}\right) = 1$ wird. Daher ist

$$E_{S\,max} = L \cdot J_{max} \cdot 2\pi\nu.$$

[2]) Eisen in oder an den Spulen würde die Wirkungen des Wechselstromes derart beeinflussen, daß die bisher aufgestellten Formeln nicht ohne weiteres angewendet werden könnten. Da aber die drahtlose Telegraphie nur mit eisenfreien Spulen arbeitet, können wir hier und in allen folgenden Betrachtungen davon absehen, die Einwirkung des Eisens zu erörtern.

Höchstwert abfällt und sich dem negativen Höchstwert nähert; dagegen ist die EMK der Selbstinduktion negativ, während sich der Strom im positiven Sinne, d. h. vom negativen zum positiven Höchstwert, bewegt. Zeichnen wir in Fig. 10 den Verlauf des Stromes und der induzierten EMK in den Linien J und E_S auf, so liegt E_S, solange J im Abfallen begriffen ist, auf der positiven Seite der Abszissenachse und auf der negativen Seite, wenn J aufsteigt. Während J, vom positiven Höchstwert kommend, sich gegen Null bewegt, steigt E_S erst zum positiven Höchstwert an. E_S erreicht diesen eine Viertelperiode später als J, die EMK der Selbstinduktion ist also gegen den Strom

Fig. 10.

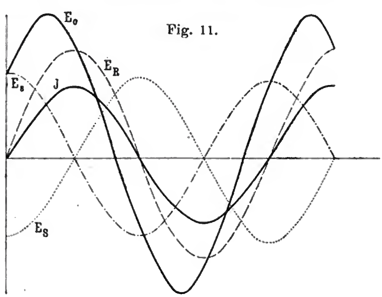


um eine Viertelperiode in der Phase **zurück**. Der Wert von $2\pi\nu t$ in der Gleichung [25] für E_S ist daher stets um 90° kleiner, als in der für den Strom gültigen Gleichung $J_{mom} = J_{max} . \sin(2\pi\nu t)$. Wir müssen daher die Gleichung [23], wenn wir sie mit derjenigen des Stromes vergleichen wollen, schreiben:

$$E_{S\,mom} = E_{S\,max} \sin(2\pi\nu t - 90).$$

Wirkung der Selbstinduktion auf die Gesamtspannung an den Enden einer stromdurchflossenen Spule. Soll in einer eisenfreien Spule ein Wechselstrom J erzeugt werden, so muß die auf die Spule wirkende Spannung E_0 erstens den durch die Länge und Dicke, sowie durch das Material des Leiters bestimmten Ohmschen Widerstand R, und zweitens die elektromotorische Gegenkraft der Selbstinduktion E_S überwinden.

Fig. 11.



Dieser doppelten Aufgabe entsprechend denken wir uns die Klemmenspannung E_0 der Spule aus zwei Komponenten zusammengesetzt: aus der Komponente E_R zur Überwindung des Ohmschen Widerstandes R und der

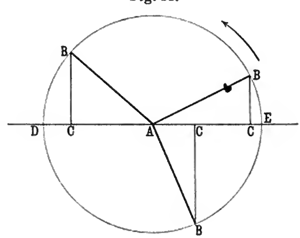
zweiten Komponente E_s, welche die elektromotorische Gegenkraft der Selbstinduktion E_S aufhebt, ihr also entgegengesetzt gerichtet und an Wert gleich sein muß. Fig. 11 soll uns diese Vorstellung erleichtern. Wir sehen in ihr die Gegenspannung E_S, die gegen den Strom J, wie in Fig. 10, um 90^0 in der Phase zurückbleibt. E_s soll in jedem Augenblick der Kraft E_S gleich, ihr jedoch entgegengesetzt gerichtet sein. E_s muß daher gegen E_S um 180^0, gegen J um 90^0 vorauseilen. Die Komponente E_R ist mit J in gleicher Phase gezeichnet, denn es liegt kein Grund für eine Verschiebung gegen J vor. E_R bleibt also auch gegen E_s um 90^0 zurück. Die Klemmenspannung E_o muß in jedem Augenblick gleich der Summe von E_R und E_s sein. Die Kurve für E_o erhält man daher, wenn man für jeden Punkt der Abszissenachse, auf der die Zeit aufgetragen ist, die Ordinaten von E_s und E_R zueinander addiert. Die Verbindungslinie der Endpunkte dieser so erhaltenen neuen Ordinaten ergibt die Kurve E_o, ebenfalls eine Sinuslinie, welche gegen J vorauseilt und zwar um so mehr, je größer E_s gegen E_R ist. Für E_o gilt daher die Gleichung

$$E_{o\,mom} = E_{o\,max} . sin\,(2\pi\nu t + \varphi) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad [26]$$

wenn φ den Winkel der Phasenverschiebung zwischen J und E_o bezeichnet. Ist $E_{o\,max}$ bekannt, so sind auch die Augenblickswerte $E_{o\,mom}$ bekannt. $E_{o\,max}$, der Höchstwert von E_o, ergibt sich, wie Fig. 11 lehrt, als die Summe der gleichzeitig mit ihm erreichten Augenblickswerte der Größen E_s und E_R. Die Summe dieser gegen $E_{o\,max}$ und untereinander in der Phase verschobenen Augenblickswerte läßt sich durch algebraische Rechnung oder durch geometrische Konstruktion finden. Wir wollen ihren Wert auf dem letzteren, für unsere Zwecke übersichtlicheren Wege suchen.

Das Vektordiagramm. Bei der Konstruktion einer Sinuslinie haben wir gesehen, wie die Werte für $sin\,\alpha$ aus dem Einheitskreise zu erhalten sind. Machen wir nun den rotierenden Radius $A—E$ nicht gleich Eins, wie in Fig. 2, sondern gleich E_{max} und lassen wir ihn mit der Geschwindigkeit $2\pi\nu$ sich drehen, so bildet er, wie Fig. 12 zeigt, nach der Zeit t einen Winkel $BAE = 2\pi\nu t$ mit der Nullinie DE. Die vom freien Ende des Schenkels AB auf DE gefällte Senkrechte BC ist dann gleich $AB . sin\,BAE$, also gleich $E_{max} . sin\,(2\pi\nu t)$. Das gilt für jede Stellung, welche AB während des Umlaufs einnimmt, also für jeden Wert der Zeit t. Diese Darstellung der veränderlichen Größe E_{mom} (BC) mit Hilfe eines rotierenden Radius nennt man ein Vektordiagramm, den Radius selbst Radiusvektor oder kurzweg Vektor.

Fig. 12.

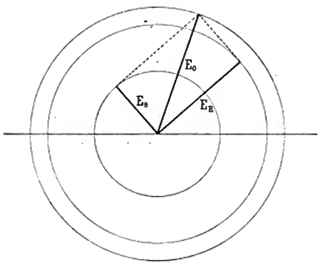


Da man in der Praxis mit Hilfe der Meßinstrumente die Mittelwerte findet, ist es bequemer, diese statt der Höchstwerte in das Diagramm als Vektor einzuzeichnen. Das ist unbedenklich, weil sich der Mittelwert gegen

den Höchstwert (s. S. 10) nur durch den konstanten Faktor $\sqrt{2}$ unterscheidet. Für unsere folgenden Betrachtungen sind daher die Mittelwerte als Vektor gewählt worden.

Das Diagramm für Ohmschen Widerstand und Selbstinduktion. Impedanz. Induktive Reaktanz. Zwei in der Phase gegeneinander verschobene Spannungen oder Ströme werden in dieser Darstellungsweise durch zwei Vektoren veranschaulicht, welche einen der Phasenverschiebung entsprechenden Winkel, den Phasenwinkel, miteinander bilden. Die Spannungen E_R und E_s würden daher durch zwei senkrecht zueinander stehende Vektoren zu versinnbildlichen sein, wie z. B. in Fig. 13. Die geometrische Addition dieser durch Größe und Richtung bestimmten Strecken erfolgt unter Anwendung des Satzes vom Parallelogramm der Kräfte in der Weise, daß aus E_R und E_s das Parallelogramm vervollständigt wird. In der Diagonale E_0 dieses Parallelogramms erhalten wir die Gesamtspannung als die Resultierende aus E_R und E_s. Aus der Figur ergibt sich, daß

Fig. 13.



$$E_0 = \sqrt{E_R^2 + E_s^2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad [27]$$

E_R war nun jederzeit gleich $J.R$, und E_s gleich $2\pi\nu L.J$, so daß wir erhalten:

$$E_0 = \sqrt{(JR)^2 + (2\pi\nu LJ)^2}$$

oder

$$E_0 = J\sqrt{R^2 + (2\pi\nu L)^2} \, . \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad [28]$$

Diese Gleichung hat dieselbe Form wie diejenige des Ohmschen Gesetzes: Die Spannung ist gleich dem Produkt aus Strom und Widerstand. Der Wurzelausdruck wird deshalb der Wechselstromwiderstand genannt. Häufig wird er auch als scheinbarer Widerstand oder Impedanz des Stromkreises bezeichnet. Der lediglich auf die Wirkung der Selbstinduktion zurückzuführende Wert $2\pi\nu L$ heißt die induktive Reaktanz.

V. Die Maxwellsche Theorie.

Der Kondensator. Zwei Platten aus einem leitenden Stoff, einander gegenübergestellt und durch eine isolierende Schicht getrennt, bilden einen Kondensator. Die Isolierschicht heißt das Dielektrikum; zumeist besteht sie aus Luft, Glas, Glimmer oder Öl. Die elektrische Erregung der einen Kondensatorplatte hat elektrische Erscheinungen auf der anderen zur Folge. Unsere Erfahrungen lehren uns, daß hierbei die isolierende Schicht, das Dielektrikum, eine Rolle spielt, denn je nach dem Stoff des Dielektrikums sind

die Wirkungen ungleich stark. Der Kondensator verhält sich Gleichstrom gegenüber anders als gegen Wechselstrom. Während er Wechselstrom durchläßt, versperrt er dem Gleichstrom den Weg. Diesen Unterschied hat sich die Technik in mancherlei Weise zunutze gemacht. Im Grunde genommen sind das aber keine unterscheidenden Merkmale des Kondensators. Dieser verhält sich einer positiven elektrischen Erregung gegenüber ebenso wie einer negativen, auch wenn beide miteinander abwechseln. Wie wir uns die Vorgänge im Kondensator zu denken haben, darüber geben die Arbeiten von Faraday Aufklärung. Die Ergebnisse der Forschungen Faradays hat Maxwell mathematisch behandelt. Wichtig ist der Nachweis, daß die elektrischen Erscheinungen mit denjenigen des Lichtes übereinstimmen. Unter denen, welche die Untersuchungen nach Maxwells Tode fortgeführt haben, ist ganz besonders Heinrich Hertz zu nennen [1]. Wir wollen versuchen, uns von der physikalischen Bedeutung der Maxwellschen Theorie, soweit sie für die drahtlose Telegraphie Interesse bietet, ein Bild zu entwerfen.

Der Äther. Wir wissen, daß elektrisch geladene Körper gewisse Wirkungen in die Ferne ausüben. Gleichnamig elektrische Holunderkügelchen z. B. stoßen sich ab, ungleichnamig elektrische ziehen sich an; eine elektrisch geladene Metallkugel vermag in einer entfernten Metallkugel elektrische Erscheinungen hervorzurufen; elektrische Ströme suchen sich parallel und gleichgerichtet zu stellen; ein Strom vermag in einem entfernten Leiter einen Strom zu induzieren. Diese und andere Fernwirkungen haben verschiedene Erklärungen gefunden. Die einen haben als Ursache „Fernkräfte" angenommen, welche durch den leeren Raum hindurch wirken, ohne daß es eines Mittels zur Fortpflanzung ihrer Wirkung bedarf. Andere dagegen stellen sich alle durch unsere Sinne unmittelbar oder mittelbar wahrnehmbaren Körper im ganzen Weltenraume als durch einen Stoff verbunden vor, der von Körper zu Körper eine Brücke schlägt und den Austausch von Wirkung und Gegenwirkung vermittelt. Nach dieser Anschauung, welche ihren Ursprung hauptsächlich den Bemühungen um eine Erklärung des Lichtes verdankt, haben wir uns den gesamten Weltenraum von einem Stoff erfüllt zu denken, dem Äther, den wir mit unseren Sinnen nicht wahrnehmen können, der vielmehr überall vorhanden ist, und nirgendwo entfernt werden kann. Alle Körper, mag uns ihr Gefüge auch noch so fest erscheinen, sind vom Äther durchsetzt. Der Äther füllt das Vakuum über dem Quecksilber des Barometers; er ist in der Luft und allen Gasen, in allen Flüssigkeiten vorhanden und durchdringt diese ebenso wie alle festen Körper. Wir müssen uns vorstellen, daß jedes kleinste Ätherteilchen auf allen Seiten ohne Zwischenraum von anderen Ätherteilchen berührt wird, und daß jedes kleinste Stoffteilchen auf allen Seiten vom Äther umgeben ist. Der Äther stellt eben eine Verbindung durch das ganze Weltall her. Wird der Zustand der Ätherteilchen an irgend einer Stelle verändert, so überträgt sich diese Änderung auf die benachbarten Ätherteilchen, pflanzt sich von Teilchen zu Teilchen fort und tritt an entfernten Stellen, welche für diese Änderung empfänglich sind, wieder in die Erscheinung. Daß solche Änderungen nicht überall in gleicher Weise wahr-

[1]) Dr. Heinr. Hertz, Ges. Abhandlungen, Leipzig 1892, S. 23.

zunehmen sind, liegt zum Teil daran, daß die verschiedenen Stoffe, die den Äther umschließen, jenen Zustandsänderungen der Ätherteilchen größeren oder geringeren Widerstand entgegensetzen, zum Teil auch daran, daß diese Zustandsänderungen zuweilen die Eigentümlichkeit besitzen, sich nicht nach allen Seiten, sondern nur in einer bestimmten Richtung fortzupflanzen.

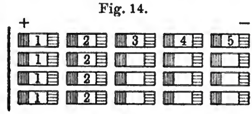
Entzünden wir z. B. in einem dunkeln Zimmer eine Kerze, so werden die Ätherteilchen durch die von ihr ausgehenden Lichtstrahlen in eine ganz bestimmte Bewegung versetzt. Die Luft im Zimmer hindert den Äther in dieser Bewegung nicht; das ganze Zimmer wird erhellt. Die Wände aber stören oder vernichten die Lichtbewegungen der Ätherteilchen; hinter den Wänden, z. B. im Nebenzimmer, bleibt es dunkel. Die Fensterscheiben wiederum beeinflussen diese Ätherbewegungen nur ganz unwesentlich, sie lassen das Licht fast unverändert hindurchtreten.

Fortpflanzung elektrischer Zustandsänderungen durch den Äther. Nach Maxwell ist der Äther auch der Träger elektrischer Erscheinungen. Die Ätherteilchen besitzen nach seiner Theorie die Fähigkeit, bei geeigneter Einwirkung von außen her einen elektrischen Zustand anzunehmen, derart, daß sie an dem einen Ende positiv, an dem anderen negativ elektrisch werden, also zwei elektrische Pole erhalten, d. h. polarisiert sind. Die ungleichnamigen Elektrizitäten werden durch den äußeren Einfluß auseinander getrieben, jedoch nicht beliebig weit; sie bleiben wie durch ein elastisches Band verknüpft noch aneinander hängen, so daß sie nur ein kleines Stück auseinander geschoben werden können und sich, wenn der äußere Einfluß zu wirken aufhört, alsbald wieder vereinigen. Ist ein Ätherteilchen polarisiert worden, so erzeugt es in dem benachbarten Teilchen denselben Zustand; auch dort werden die Elektrizitäten auseinander geschoben, und so schreitet die Polarisierung von Teilchen zu Teilchen fort. Das Vorhandensein von Fernkräften, auch solchen, die nur in dem engen Bereich zwischen zwei Ätherteilchen wirken und von einem Ätherteilchen zum anderen die Polarisierung hervorrufen könnten, hat Maxwell nicht zugegeben. An ihre Stelle treten vielmehr die Polarisationen selbst, *sie* sind die vorhandenen Tatsachen, die wir für diese Betrachtungen als den Ausgangspunkt annehmen müssen; denn obwohl die Wissenschaft bis heute auf dem Wege dieser Theorien erfolgreich weiter geschritten ist, hat sich noch keine ausreichende Erklärung dafür gefunden, wie die Polarisationen der Ätherteilchen *entstehen* und wie sie sich *übertragen*.

Die Verschiebungsströme. Wenn an eine Platte eines Kondensators der positive Pol einer Elektrizitätsquelle gelegt wird, so ruft dies eine Polarisation in den Ätherteilchen des Dielektrikums hervor. Die positive und die negative Elektrizität werden, wie es Fig. 14 andeutet, auf den einzelnen Ätherteilchen auseinander geschoben. Die Polarisation erfolgt aber nicht für alle Teilchen gleichzeitig. Zunächst erscheint sie auf allen Teilchen 1; von diesen wird sie auf die Teilchen 2 übertragen, von diesen auf 3, auf 4, 5 usw. Die Elektrizität schreitet also gleichsam in dem Dielektrikum fort, sie strömt in das Dielektrikum hinein. Diesen Strom nennt Maxwell den *Verschiebungsstrom*. Fügen wir in einen Stromkreis einen Kondensator ein, so

können wir den Stromkreis noch als geschlossene Bahn betrachten, denn der im Leiter fließende Strom setzt sich durch das Dielektrikum hindurch in der Gestalt des Verschiebungsstromes fort. Mit diesem Strome fließt eine bestimmte Elektrizitätsmenge in den Kondensator. Die elektrische Verschiebung in dem Dielektrikum ist allerdings, wie wir gesehen haben, eng begrenzt, weil die Ätherteilchen der Verschiebung Widerstand entgegensetzen. Die Überwindung dieses Widerstandes erfordert einen gewissen Energieaufwand, der von der Elektrizitätsquelle zu leisten ist. Nach dem Gesetze von der Erhaltung der Arbeit wird diese Energie aber wieder frei, wenn der äußere Druck, die EMK, zu wirken aufhört, die elastischen Spannungen in den einzelnen Ätherteilchen sich auslösen und die verschobenen Elektrizitäten in ihre Ruhelage zurückkehren können. Es entsteht dann ein Verschiebungsstrom entgegengesetzter Richtung.

Fig. 14.



Das Entstehen des Verschiebungsstromes ist mit dem Zusammendrücken einer elastischen Spiralfeder verglichen worden. Üben wir einen Druck von bestimmter Stärke auf eine Spiralfeder aus, so können wir sie zusammendrücken, bis die Gegenspannung der Feder dem Druck das Gleichgewicht hält; alsdann tritt Ruhe ein. Dem Druck entspricht die EMK, der Gegenspannung der Feder der elastische Widerstand des Äthers im Dielektrikum. Je stärker der Druck auf die Feder wirkt, um so mehr wird sie zusammengedrückt — je größer die EMK ist, um so kräftiger ist der Verschiebungsstrom. Dem Zurückschnellen der Feder nach der Beseitigung des Druckes entspricht das Zurückströmen der Elektrizitäten in ihre Ruhelage.

Der metallische Leiter ist auch als ein Bündel aus vielen dünnen parallelen Röhrchen dargestellt worden, durch welche von einer Druckkraft, der EMK, eine Flüssigkeit getrieben wird, so daß eine Strömung, der elektrische Strom, entsteht. An der Grenze zwischen Leiter und Dielektrikum sind die Röhrchen durch dünne elastische Membrane verschlossen zu denken. Unter dem Druck der Flüssigkeit geben diese Membrane nach und gestatten auch in dem Dielektrikum noch eine gewisse Verschiebung oder Strömung der Flüssigkeit.

Wir erkennen also, daß die Nichtleiter oder die Dielektrika dem elektrischen Strome keineswegs den Weg versperren. Der Widerstand, den sie ihm entgegensetzen, ist nur anderer Art als derjenige, welchen der Strom in den Leitern findet. Legen wir an ein versenktes Telegraphenkabel, dessen Ende isoliert ist, den freien Pol einer geerdeten Batterie, so schreitet die Elektrizität nicht nur in dem Kupferleiter des Kabels vom Anfang bis zu dessen Ende fort, sondern längs des ganzen Leitungsdrahtes dringt sie in der Gestalt von Verschiebungsströmen auch in die isolierende Schicht ein. Die in allen Punkten des Drahtes entspringenden, die Guttaperchahülle durchsetzenden Verschiebungsströme summieren sich zu einer Wirkung, die mit der Länge des Kabels wächst. Schneiden wir die Zuführung zur Batterie ab, so besitzt der Leitungsdraht des Kabels immer noch die ihm durch die Batterie erteilte Spannungsdifferenz gegenüber der jenseits der Guttaperchahülle befindlichen Erd- oder Wasserschicht. Die Verschiebung der Elektrizi-

täten in der Isolierschicht bleibt unter dem Einfluß dieser Spannung vorläufig bestehen. Beseitigen wir die Spannungsdifferenz aber dadurch, daß wir den Draht mit der Erde verbinden, so hört der auf das Dielektrikum wirkende Druck auf, und die Elektrizitäten fließen zurück. In jedem Kondensator, wo an Stelle des Leitungsdrahtes und der Erde sich zwei Leiterplatten gegenüberstehen, spielt sich dieser Vorgang in derselben Weise ab. Die Verschiebungsströme sind die Ladungs- und Entladungsströme.

Die Stärke dieser Ströme ist direkt proportional der auf den Kondensator wirkenden EMK sowie der Größe seiner Leitungsplatten. Ferner hängt sie von der Natur des Dielektrikums ab, denn der Widerstand, welchen die Ätherteilchen der elektrischen Polarisation entgegensetzen, wird von dem sie umgebenden Stoff beeinflußt. Einige Dielektrika gestatten eine kräftigere Verschiebung der Elektrizitäten als andere. Dem entsprechend sind auch die Ladungs- und Entladungsströme unter sonst gleichen Umständen für verschiedene Dielektrika verschieden stark. Für einen und denselben Kondensator sind die aus der Plattengröße und aus der Art des Dielektrikums herrührenden Einflüsse auf die Größe des Ladestromes unveränderlich. Bezeichnen wir sie mit C und nennen wir Q diejenige Elektrizitätsmenge, welche durch den Ladestrom in den Kondensator hineingetragen wird, und ist ferner E die zwischen den Kondensatorbelegungen herrschende Spannung, so ist

$$Q = C . E \quad \ldots \ldots \ldots \quad [29]$$

In dieser Gleichung stellt C die Aufnahmefähigkeit oder **Kapazität** des Kondensators dar.

Die Verschiebungs- oder Lade- und Entladeströme sind von sehr kurzer Dauer, so daß der Ruhezustand bald eintritt, wenn die auf den Kondensator wirkende EMK unverändert bleibt. Wird diese EMK vergrößert, so entsteht ein neuer Verschiebungsstrom; läßt ihre Stärke nach, so gewinnt die Gegenspannung des Dielektrikums das Übergewicht, und es entsteht der Verschiebungsstrom entgegengesetzter Richtung.

Legen wir aber eine Wechselspannung an den Kondensator, so ändern die Verschiebungsströme mit ihr fortwährend ihre Stärke und Richtung; sie treten uns also als Wechselströme entgegen, und zwar als Sinusströme, wenn die Spannung nach dem Sinusgesetz wechselt. Im Kondensator pflanzen sich Wechselströme also fort, allerdings nicht ganz ohne Veränderung, wie wir im folgenden sehen werden.

VI. Der Kondensator im Wechselstromkreise.

Stromstärke im Kondensator. Wir bezeichnen eine an einen Kondensator gelegte Wechselspannung mit E_c, den von dieser erzeugten, den Kondensator durchfließenden Wechselstrom mit J_c. Denken wir uns die Dauer einer Periode der auf den Kondensator wirkenden Wechselspannung in viele gleiche Teile geteilt, deren jeder gleich dt sein soll, so möge in dieser Zeit die Spannung E_c ihren Wert um den kleinen Betrag dE_c ändern. Durch die Spannungsänderung wird im Kondensator ein Strom J_c erzeugt. Es soll nun dt so klein gewählt werden, daß J_c während dieser Zeit als unveränderlich angesehen werden kann. Die in der Zeit dt von dem Strome J_c in den

Kondensator beförderte Elektrizitätsmenge ist gleich dem Produkte von Strom und Zeit, also gleich $J_c . dt$. Andererseits ist sie nach der Gleichung [29] gleich $C . dE_c$, so daß wir erhalten:

$$J_c . dt = C . dE_c \quad \ldots \ldots \ldots \quad [30]$$

oder

$$J_c = C \cdot \frac{dE_c}{dt} \quad \ldots \ldots \ldots \quad [31]$$

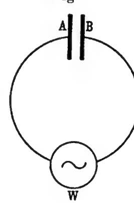
Diese Gleichung hat die Form der Gleichung [23] für die EMK der Selbstinduktion. Wie die mathematische Ableitung zeigt [1]), ergibt sich für den Höchstwert des Kondensatorstromes analog der Gleichung [24] die Beziehung

$$J_{c\,max} = 2\pi\nu . C . E_{c\,max} \quad \ldots \ldots \ldots \quad [32]$$

Phasendifferenz zwischen Kondensatorstrom und Kondensatorspannung. Kondensatorstrom und Kondensatorspannung sind (ähnlich wie wir es bei der Selbstinduktion gefunden haben) in der Phase gegeneinander verschoben. In dem Augenblicke, wo die Spannung E_c ihren Höchstwert erreicht, ist der Strom J_c gleich Null, denn in diesem Augenblicke ist die Spannungs**änderung**, die Ursache des Stromes, gleich Null. Die Spannungsänderung ist am größten, der Strom also am stärksten, wenn E_c durch Null hindurchgeht.

In Fig. 15 ist ein Kondensator mit den Belegungen A und B dargestellt. Die Wechselstromquelle W bringt die beiden Belegungen auf Spannungsunterschiede, welche sich zeitlich nach dem Sinusgesetz ändern. So lange das Potential der Belegung A in positivem Sinne, d. h. vom negativen Höchstwert durch Null zum positiven Höchstwert ansteigt, muß positive Elektrizität aus W nach A hingeführt werden. In dieser Zeit ist also der aus W in den Kondensator fließende Strom positiv. Wenn das Potential von A den positiven Höchstwert erreicht hat, fließt kein Strom mehr von W nach A, und sobald das Potential zu sinken anfängt, strömt positive Elektrizität aus A durch W hindurch nach B. Die Stromrichtung ist also jetzt negativ und zwar so lange, bis die Klemmenspannung in A den negativen Höchstwert erreicht hat. Zeichnen wir in Fig. 16 (a. f. S.) die Sinuskurven für den Strom J und die Spannung E_c auf, so sehen wir die letztere in der Zeit

Fig. 15.



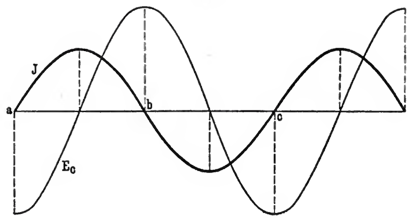
[1]) $J_c = C \frac{dE_c}{dt}$,

$$E_c = E_{c\,max} \sin(2\pi\nu t),$$
$$dE_c = E_{c\,max} . 2\pi\nu . \cos(2\pi\nu t) . dt,$$
$$= E_{c\,max} . 2\pi\nu . \sin\left(2\pi\nu t + \frac{\pi}{2}\right) dt,$$
$$J_c = C . E_{c\,max}\, 2\pi\nu . \sin\left(2\pi\nu t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Der Höchstwert $J_{c\,max}$ wird erreicht, wenn $\sin\left(2\pi\nu t + \frac{\pi}{2}\right) = 1$ ist, d. h. es ist $J_{c\,max} = C . E_{c\,max} . 2\pi\nu$.

von a bis b im positiven Sinne aufsteigen, von b bis c in negativem Sinne abfallen. Deshalb muß die Stromkurve von a bis b auf der positiven, von b bis c auf der negativen Seite der Abszissenachse liegen. Während die Spannungskurve von Null zum positiven Höchstwert ansteigt, kehrt die Stromkurve von diesem Wert schon wieder nach Null zurück. Der Strom eilt der Spannung also um eine Viertelperiode voraus.

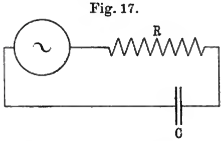
Fig. 16.



Die in positivem Sinne von W nach A (Fig. 15) beförderte Elektrizitätsmenge erzeugt im Dielektrikum zwischen A und B einen Gegendruck, d. h. einen Druck, der in negativem Sinne wirkend zunimmt, solange die positive Elektrizitätsmenge auf A anwächst. Dieser Gegendruck wird als die elektromotorische Gegenkraft E_C des Kondensators bezeichnet; sie ist, wenn vom Widerstande im Stromkreise abgesehen wird, der Klemmenspannung E_c stets an Wert gleich, jedoch entgegengesetzt gerichtet.

Das Diagramm für Kapazität und Ohmschen Widerstand. Kapazitätsreaktanz. Schließen wir eine Wechselstrommaschine über einen Kondensator von der Kapazität C und einen induktionsfreien Widerstand R, wie in Fig. 17, so können wir in diesem Stromkreise zwei verschiedene Spannungen messen, den Ohmschen Spannungsabfall E_R an den Enden des Widerstandes, $E_R = R \cdot J$, und die Spannung an den Belegungen des Kondensators, $E_c = \frac{J_c}{C \cdot 2 \pi \nu}$. Der Strom J ist im ganzen Stromkreise zu jeder Zeit überall derselbe. Den Gesamtwert der Spannung, welche in jedem Augenblick von der Maschine zu liefern ist, um den Strom J zu erzeugen, finden wir (wie bei der Selbstinduktion a. S. 20) durch geometrische Addition der Einzelspannungen im Vektordiagramm. E_R wird weder durch Selbstinduktion noch durch Kapazität beeinflußt, befindet sich daher mit J in gleicher Phase; E_c ist gegen J und daher auch gegen E_R um 90° zurück. E_c und E_R werden also durch zwei senkrecht zueinander stehende Vektoren, OA und OB in Fig. 18, dargestellt. Als Summe dieser beiden Vektoren ergibt sich nach der Vervollständigung des Parallelogramms $OACB$ die Diagonale $OC = E_0$. Aus dem rechtwinkligen Dreieck OAC folgt

Fig. 17.



$$E_0 = \sqrt{E_R^2 + E_c^2} \quad \ldots \ldots \quad [33]$$

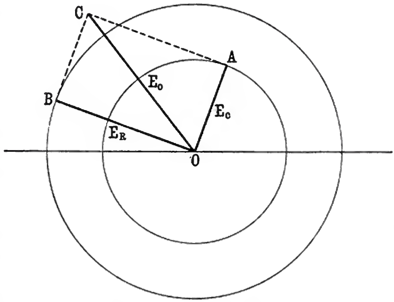
$$= J \cdot \sqrt{R^2 + \frac{1}{(C \cdot 2\pi\nu)^2}} \quad \ldots \ldots \quad [34]$$

Der Wurzelausdruck in dieser Gleichung wird als der **Wechselstromwiderstand des Stromkreises** bezeichnet, weil er dem Widerstande in der analogen Formel für das Ohmsche Gesetz, $E = J \cdot R$, entspricht. Der Ausdruck

$$\frac{1}{C \cdot 2\pi\nu}$$

heißt die **Kapazitätsreaktanz**; er bezeichnet den Widerstand, welchen der Kondensator allein dem Wechselstrom entgegensetzt (vgl. Gleichung [32]). Da C und ν im Nenner stehen, erkennen wir, daß der Wechselstromwiderstand eines Kondensators um so kleiner ist, je größer seine Kapazität und je höher die Periodenzahl des Wechselstromes ist oder umgekehrt, daß die Stromstärke im Kondensator mit der Kapazität und der Periodenzahl wächst.

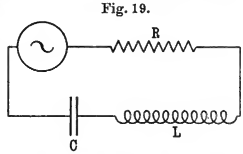
Fig. 18.



VII. Widerstand, Selbstinduktion und Kapazität im Wechselstromkreise. Resonanz.

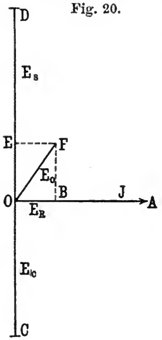
Selbstinduktion und Kapazität in Reihe; Spannungsdiagramm. Legen wir in den soeben behandelten Stromkreis noch eine Selbstinduktionsspule, für welche wir die Voraussetzung machen, daß sie nur Selbstinduktion, aber keinen Ohmschen Widerstand besitzen soll, so erhalten wir das Bild der Fig. 19. Auch bei dieser Anordnung ist der Strom überall derselbe, denn alle Teile sind hintereinandergeschaltet. Die Spannung, welche jetzt auf den Stromkreis wirken muß, um den Strom J zu erzeugen, setzt sich zusammen aus der Spannung E_R an den Enden des Widerstandes, der Spannung E_c an den Belegungen des Kondensators und der Spannung E_s, welche zur Überwindung der EMK der Selbstinduktion nötig ist. Die Spannung E_R ist in gleicher Phase mit dem Strome J, die Spannung E_c bleibt um 90° hinter ihm zurück, während E_s ihm, wie wir früher gesehen haben (s. S. 18 f.), um 90° voraneilt. Das Vektordiagramm setzt sich für diesen Fall folgendermaßen zusammen: Gibt in Fig. 20 der Vektor OA die Richtung des Stromes an, so ist die Spannung E_R in der-

Fig. 19.



selben Richtung aufzutragen. Ihr Wert sei durch OB gegeben. Senkrecht zu OB stehen dann $E_c = OC$ und $E_s = OD$, und zwar E_c um 90° hinter OB zurückbleibend, E_s um 90° vor OBvorauseilend. Die geometrische Addition von E_c und E_s ergibt, da beide in derselben Geraden liegen, aber in entgegengesetzter Richtung wirken, die Differenz der beiden Strecken $OD - OC = OE$. Nun setzt sich OE mit OB zu OF zusammen. OF gibt also die gesamte von der Wechselstrommaschine zu liefernde Spannung E_o an. Aus dem rechtwinkligen Dreieck FEO erhalten wir:

Fig. 20.



$$E_o = \sqrt{E_R^2 + (E_s - E_c)^2} \quad . \quad . \quad . \quad [35]$$

Setzen wir für E_R den Wert $J . R$ und für E_s und E_c die nach den Gleichungen [24] und [32] sich ergebenden Werte ein, so folgt

$$E_o = J \sqrt{R^2 + \left(2 \pi \nu L - \frac{1}{2 \pi \nu C}\right)^2} \quad . \quad [36]$$

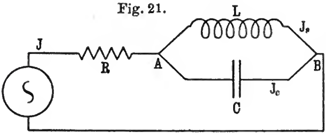
und

$$J = \frac{E_o}{\sqrt{R^2 + \left(2 \pi \nu L - \frac{1}{2 \pi \nu C}\right)^2}} \quad . \quad . \quad [37]$$

Die Analogie auch dieser Gleichung mit dem Ohmschen Gesetz ist deutlich zu erkennen. Der Wurzelausdruck gibt auch hier den Wechselstromwiderstand des Stromkreises an.

Selbstinduktion und Kapazität in Parallelschaltung; Stromdiagramm. Verändern wir den Stromkreis so, daß der Kondensator und die Selbstinduktion parallel zueinander liegen, wie es Fig. 21 zeigt, so verzweigt sich der Strom J; der eine Teil, J_s, geht durch die Selbstinduktionsspule L, der andere Teil, J_c, durch den Kondensator C. Wählen wir die Verbindungen zwischen der Spule und dem Kondensator dick und kurz genug, um ihren Widerstand vernachlässigen zu können, und behalten wir unsere Voraussetzung, daß die Selbstinduktion widerstandslos sein soll, bei, so herrscht an den Enden der Spule und zwischen den Kondensatorbelegungen stets dieselbe Spannung E. Der Strom J ist mit dieser Spannung in gleicher Phase, J_c eilt ihr und daher auch dem Strome J um 90° voraus, J_s bleibt hinter J um 90° zurück. J, J_c und J_s lassen sich daher in derselben Weise addieren, wie vorher die Spannungen. Wir erhalten für den Gesamtstrom J_o, den die Maschine in den Stromkreis zu liefern hat, aus dem Diagramm (Fig. 22) den Wert

Fig. 21.



$$J_o = \sqrt{J^2 + (J_c - J_s)^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad [38]$$

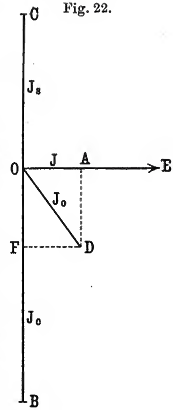
$$= E \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(2 \pi \nu C - \frac{1}{2 \pi \nu L}\right)^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad [39]$$

Resonanzerscheinungen. Aus den Diagrammen in den Figg. 20 und 22 erkennen wir, daß die Wirkungen der Selbstinduktion und der Kapazität einander entgegengesetzt gerichtet sind, so daß nur ihre Differenz zur Geltung kommt. In den Gleichungen [36] und [39] ist diese Differenz durch die eingeklammerten Größen

$$\left(2\pi\nu L - \frac{1}{2\pi\nu C}\right) \quad \text{und} \quad \left(2\pi\nu C - \frac{1}{2\pi\nu L}\right)$$

ausgedrückt. Wird diese Differenz gleich Null, so verlieren die Selbstinduktion und die Kapazität ihre Wirkung auf die Belastung der Maschine vollkommen. Die Gleichungen [36] und [39] erhalten dann die reine Form des Ohmschen Gesetzes $E = J \,.\, R$ oder $J = \frac{E}{R}$ und ergeben die kleinsten Werte für E_0 bzw. J_0. In den Diagrammen wird E_0 gleich E_R und J_0 gleich J. Beide Umstände beweisen übereinstimmend, daß es durch passende Abgleichung von Selbstinduktion und Kapazität möglich ist, in einem der behandelten Wechselstromkreise solche Spannungs- und Stromverluste, welche nicht durch das Ohmsche Gesetz bedingt sind, zu vermeiden. Soll für die richtige Abgleichung von Selbstinduktion und Kapazität die eben angegebene Bedingung, daß nämlich die Differenzen

Fig. 22.



$$\left(2\pi\nu L - \frac{1}{2\pi\nu C}\right) \quad \text{und} \quad \left(2\pi\nu C - \frac{1}{2\pi\nu L}\right)$$

gleich Null werden, erfüllt sein, so muß

$$2\pi\nu L = \frac{1}{2\pi\nu C} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad [40]$$

sein, oder

$$\frac{1}{\nu} = 2\pi\sqrt{C.L} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad [41]$$

und daher nach Gleichung [13]

$$T = 2\pi\sqrt{CL} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad [42]$$

Eine derartige Abgleichung zwischen Selbstinduktion, Kapazität und der Periodenzahl des Wechselstromes wird Resonanz zwischen diesen Größen genannt. Sie tritt ein, wenn die Periode T der durch den Kondensator und durch die Selbstinduktionsspule fließenden Ströme den Bedingungen der Gleichung [42] entspricht.

Um in der Praxis eine Kapazität und eine Selbstinduktion mit der Periodenzahl eines gegebenen Wechselstromes in Resonanz zu bringen, würde man z. B. in einer nach Fig. 21 geschalteten Anordnung zwischen die Wechselstrommaschine und den Widerstand R einen Strommesser einschalten und dann L und C so lange verändern, bis dieser Strommesser den kleinsten Ausschlag zeigt. In diesem Augenblick tritt Resonanz ein. Das Wesen der Resonanz werden wir in den folgenden Abschnitten noch genauer verstehen lernen. Es möge hier nur auf einige, durch den Versuch leicht erkennbare

Erscheinungen hingewiesen werden. Schalten wir außer dem vor R liegenden Strommesser, der den Strom J anzeigt, einen zweiten unmittelbar vor die Kapazität und einen dritten vor die Selbstinduktion zur gleichzeitigen Bestimmung der Ströme J_c und J_s, so zeigen auch diese beiden Meßinstrumente Ströme an, wie es dem Diagramm in Fig. 22 (S. 29) entspricht. Während der Abstimmung von C und L auf einen Minimalwert für J kann man beobachten, daß sich auch die Werte für J_c und J_s ändern, und zwar fallen sie, während J steigt; sie werden dagegen um so größer, je kleiner J wird, je genauer C und L also auf Resonanz abgestimmt sind. Bei vollkommener Resonanz erreichen sie ihren Höchstwert.

Ähnlich liegen die Verhältnisse in einer nach Fig. 19 (S. 27) geschalteten Anordnung. Hier herrscht im ganzen Kreise zwar dieselbe Stromstärke, es lassen sich aber, dem Diagramm in Fig. 20 (S. 28) entsprechend, verschiedene Spannungen messen. Wird mit E_0 die zwischen dem linken Pol der Maschine und dem rechten Ende des Widerstandes R (Fig. 19) gemessene Spannung bezeichnet, so ist diese ein Minimum, wenn C und L der Gleichung [42] genügen. Dann ergeben sich aber für die Spannung E_c an den Belegungen des Kondensators und E_s an den Enden der Selbstinduktion gleichzeitig Höchstwerte.

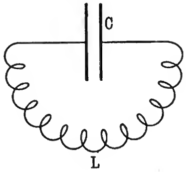
Während also an einer Stelle die Ströme oder Spannungen ihre geringsten Werte erreichen, können wir durch Resonanz in anderen Teilen der Stromkreise Höchstwerte erzielen. Das Eigenartige hierbei ist, daß die absoluten Werte dieser durch Resonanz erzeugten Ströme und Spannungen höher sind, als die von der Maschine tatsächlich hergegebene Ampere- und Voltzahl. Sie lassen sich sogar ganz wesentlich erhöhen, wenn C und L unter Berücksichtigung der Gleichungen [24] und [32] passend gewählt werden. Bei Parallelschaltung von Selbstinduktion und Kapazität entsteht Stromresonanz, bei Hintereinanderschaltung Spannungsresonanz. Beide Arten der Resonanz werden in der Technik für verschiedene Zwecke verwendet; sie können auch ungewollt auftreten und dann recht lästig oder gefährlich werden. Im folgenden werden wir sehen, in wie mannigfacher Weise Resonanzwirkungen für die Zwecke der drahtlosen Telegraphie ausgenutzt werden.

VIII. Elektromagnetische Schwingungen.

Schwingungskreis aus Kondensator und Selbstinduktion, von einer Wechselstrommaschine erregt. Wenn in einem nach Fig. 21 (S. 28) geschalteten Stromkreise die Kapazität C und die parallel zu ihr liegende Selbstinduktion L sich in Resonanz befinden, so hängt die Größe des aus der Maschine entnommenen Stromes nur von der Größe des induktionsfreien Widerstandes R ab, sofern wir die Voraussetzung beibehalten, daß sonst kein Ohmscher Widerstand vorhanden sein soll. Die in C und L fließenden Ströme sind, da Resonanz herrscht, ihrem Werte nach einander gleich, in der Phase jedoch um eine halbe Periode gegeneinander verschoben. Während z. B. durch den Kondensator in der Richtung von A nach B ein positiver Strom fließt, wandert durch die Induktionsspule in derselben Richtung ein gleich starker negativer Strom, d. h. mit anderen Worten: geht der positive Strom in dem Kondensator von links nach rechts, so geht er in der Selbst-

induktionsspule zur selben Zeit von rechts nach links. Der Kondensator und die Spule bilden also für sich einen unabhängigen geschlossenen Kreis, in welchem beide hintereinander geschaltet sind. Der Strom ist daher in jedem Augenblick an allen Punkten dieses Kreises derselbe, und zwar ein Wechselstrom, dessen Periode, da sie mit derjenigen des Maschinenstromes übereinstimmt, der Gleichung [42] unterliegt. Wenn wir nun R in Fig. 21 (S. 28) immer mehr vergrößern und schließlich unendlich groß machen, so wird der aus der Maschine entnommene Strom J immer kleiner und zuletzt gleich Null. Die elektrischen Vorgänge in dem aus C und L gebildeten Kreise, dem Kondensatorkreise, werden hierdurch jedoch nicht gestört. Da der Kondensatorkreis nach unserer Annahme keinen Ohmschen Widerstand enthalten soll, Energieverluste also nicht entstehen können, so dürfen wir folgern, daß der Strom in diesem Kreise auch fortbestehen wird, wenn die Maschine ganz abgeschaltet ist, so daß nur die in Fig. 23 dargestellte Anordnung übrig bleibt. Nachdem der Vorgang einmal eingeleitet ist, wird zu einer bestimmten Zeit z. B. der positive Strom von links, der negative von rechts her in den Kondensator fließen und als Verschiebungsstrom in das Dielektrikum eindringen, bis der elastische Widerstand des Dielektrikums ihm das Gleichgewicht hält; dann wird für einen Augenblick Ruhe eintreten, sobald die Potentialdifferenz zwischen den Belegungen des Kondensators ihren Höchstwert erreicht hat; der Kondensator ist geladen und zwar auf der linken Belegung positiv, auf der rechten negativ; der Strom ist gleich Null. Im nächsten Augenblick aber setzt die Bewegung in entgegengesetzter Richtung wieder ein; die Gegenspannung des Dielektrikums gewinnt die Überhand; die positive Ladung fließt nach links, die negative nach rechts hin ab und trifft die Selbstinduktionsspule. Wenn die Potentialdifferenz am Kondensator Null geworden, der Kondensator also wieder entladen ist, erreicht der Strom seinen Höchstwert, er hat jedoch jetzt die entgegengesetzte Richtung wie bei der vorausgegangenen Ladung des Kondensators. Bei seinem Eintritt in die Selbstinduktionsspule erzeugt der Strom eine elektromotorische Gegenkraft, die ihre Ursache in dem Anwachsen des magnetischen Feldes hat, welches rings um den stromdurchflossenen Leiter entsteht. Diese Gegen-EMK verzögert zunächst das Ansteigen des Stromes. Bei seinem Verschwinden tritt, wie wir früher gesehen haben, eine ähnliche EMK auf, welche ihn zu verlängern sucht. Die Selbstinduktion verlängert also die gesamte Dauer des Stromstoßes, sie erteilt dem Strome ein Beharrungsvermögen, so daß er erst zur Ruhe kommt, wenn er den Kondensator wieder erreicht hat, wo er auf den elastisch federnden Widerstand des Dielektrikums stößt. Infolge dieses Widerstandes nimmt die Stromstärke allmählich ab, während die Potentialdifferenz der Belegungen wieder zunimmt. Wenn diese ihren Höchstwert erreicht hat, tritt zum andernmale für einen Augenblick Ruhe ein; die linke Platte ist jetzt negativ, die rechte positiv geladen. Sofort aber beginnt die Entladung des Kondensators von neuem. Es entsteht wieder ein Strom, der von der einen Kondensatorplatte durch die Selbstinduktionsspule

Fig. 23.



zu der andern Kondensatorplatte fließt. Derselbe Vorgang spielt sich also immer von neuem ab und setzt sich periodisch fort. In stetem Wechsel fließt ein Strom von links nach rechts und von rechts nach links: der Kondensator nimmt dabei Ladung auf und gibt Ladung ab; die Selbstinduktionsspule erzeugt eine gegen den Strom wirkende und dann eine mit ihm wirkende EMK.

Die vom Kondensator aufgenommene Energie ist, da Stromverluste der gemachten Annahme nach nicht eintreten, jedesmal dieselbe; sie muß daher auch unvermindert wiedergewonnen werden. Sie wird in dem Entladungsstrom frei; aber beim Eintritt in die Selbstinduktionsspule wird sie während der Erzeugung des magnetischen Feldes wieder gebunden. Die elektrische Energie des Kondensators wird also in der Spule in magnetische umgewandelt. Diese magnetische Energie kann aber auch nicht verloren gehen; sie erzeugt wieder elektrische Energie, denn beim Verschwinden des Magnetfeldes entsteht ein Strom, der den Kondensator von neuem lädt. So tritt eine periodisch wechselnde Umwandlung von elektrischer in magnetische und von magnetischer in elektrische Energie ein. Bezeichnet man mit A_c diejenige Energie oder elektrische Arbeit, welche zur Ladung eines Kondensators aufzuwenden ist, und mit A_s diejenige elektrische Arbeit, welche zur Bildung des magnetischen Feldes einer Selbstinduktionsspule verbraucht wird, so gilt

$$A_c = \frac{CE^2}{2} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad [43]$$

und

$$A_s = \frac{LJ^2}{2} \text{[1]} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad [44]$$

---

[1]) Erzeugt die an einen Kondensator mit der Kapazität C gelegte Spannung E_c den Strom J_c, so ist die in der sehr kurzen Zeit dt vom Kondensator aufgenommene Energiemenge

$$= E_c \,.\, J_c \,.\, dt,$$

$$J_c = C \cdot \frac{d E_c}{dt}$$

$$= E_c \cdot C \cdot \frac{d E_c}{dt} \cdot dt$$

$$= C \,.\, E_c \,.\, d E_c.$$

Hiernach ist die Gesamtenergie, welche der Kondensator während der ganzen Zeit der Ladung aufnimmt, die Ladungsenergie, $A_c = \int C \cdot E_c \cdot dE_c = C \cdot \frac{E_c^2}{2}$.

Die von der Selbstinduktionsspule in der Zeit dt aufgenommene bzw. abgegebene Leistung ist

$$= E_s \,.\, J_s \,.\, dt.$$

$$E_s = L \cdot \frac{d J_s}{dt}$$

$$= L \cdot \frac{d J_s}{dt} \cdot J_s \cdot dt$$

$$= L \,.\, J_s \,.\, d J_s.$$

Mithin ist die Gesamtenergie, die magnetische Feldenergie, $A_s = \int L \,.\, J_s \,.\, dJ_s = L \frac{J_s^2}{2}$. Die kinetische Energie einer mit der Geschwindigkeit v bewegten Masse m ist $= \frac{m v^2}{2}$.

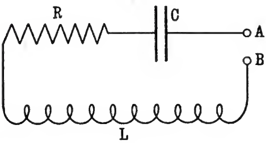
worin C die Kapazität des Kondensators, E die Spannung, auf welche seine Belegungen geladen werden, L den Selbstinduktionskoeffizienten und J die Stromstärke bedeuten. Sehen wir zunächst von allen Verlusten ab, so ist $\frac{CE^2}{2} = \frac{LJ^2}{2}$. Die Ladungsenergie des Kondensators ist hierbei zu vergleichen mit der Energie der Ruhe, der potentiellen Energie; die magnetische Energie, welche der in Bewegung befindliche Strom erzeugt, mit der Energie der Bewegung, der kinetischen Energie. Dieses Hin- und Herpendeln des Stromes, das periodische Umwandeln der Energien, bezeichnet man als elektromagnetische Schwingungen. Der aus Kapazität und Selbstinduktion zusammengeschaltete Stromkreis heißt der Schwingungskreis. Die Periode einer solchen Schwingung umfaßt den Zeitraum, innerhalb dessen z. B. das Potential einer Kondensatorplatte vom positiven Höchstwert erst auf Null abfällt, dann durch den negativen Höchstwert zu Null zurückkehrt und wieder zum positiven Höchstwert ansteigt, oder den Zeitraum, welcher einer Periode des im Schwingungskreise fließenden Wechselstromes entspricht. Dieser Zeitraum, nach der Gleichung [42] berechnet, ergibt sich gleich $2\pi\sqrt{CL}$.

Entstehung von Schwingungen bei der Entladung eines Kondensators. Eigenschwingungen. Es ist nicht notwendig, zur Einleitung der elektromagnetischen Schwingungen den Schwingungskreis mit einer Wechselstrommaschine zu verbinden, denn wir haben gesehen, daß die Stromquelle, wenn der Kondensator einmal geladen worden ist und die Entladung begonnen hat, ganz entfernt werden kann, also ohne Einfluß auf den weiteren Verlauf der Schwingungen bleibt. Laden wir daher den Kondensator aus irgend einer beliebigen Elektrizitätsquelle und entladen ihn dann über einen mit Selbstinduktion behafteten widerstandslosen Leiter, so spielen sich die besprochenen Vorgänge in derselben Weise ab. Die Periodenzahl der auftretenden Schwingungen ist durch keinen von außen kommenden Wechselstrom gegeben, mit dem sich der Schwingungskreis in Resonanz befindet, denn ein solcher ist nicht vorhanden. Sie wird jedoch in derselben Weise durch die Kapazität und Selbstinduktion des Schwingungskreises beeinflußt, wie in dem vorher besprochenen Falle; die Gleichung [42] behält auch hier ihre Gültigkeit. Da C und L aber an eine Resonanzbedingung nicht gebunden sind, die Dauer dieser Schwingungen auch nicht von der Frequenz eines gegebenen Wechselstromes, sondern lediglich von den dem Schwingungskreise eigentümlichen Werten für C und L abhängt, werden diese Schwingungen als die Eigenschwingungen des Kreises bezeichnet. Sie ändern ihre Schwingungsdauer, wenn C oder L verändert wird.

Dämpfung der Schwingungen. Kontinuierliche und oszillatorische Kondensatorentladung. Schwingungen treten nicht bei jeder Entladung eines Kondensators auf. Ihr Entstehen hängt wesentlich von dem Widerstande des Kondensatorkreises ab. Bisher haben wir für unseren Schwingungskreis stets die Annahme gemacht, daß er vollkommen widerstandslos sein soll. Diese Voraussetzung läßt sich jedoch in der Praxis niemals erfüllen. Ist aber Widerstand vorhanden, so wird zu seiner Über-

windung bei jeder Stromsendung ein Teil der Energie verbraucht und in Wärme verwandelt. Dieser Teil geht für die Schwingungen verloren. Die Schwingungen werden hierdurch geschwächt, d. h. sie werden **gedämpft**. Der Widerstand kann so groß sein, daß er den gesamten im Kondensator aufgespeicherten Energievorrat in Stromwärme verwandelt, so daß zu einer neuen Aufladung des Kondensators keine Energie mehr übrig bleibt. In diesem Falle können keine Schwingungen entstehen: die Entladung erfolgt **kontinuierlich** oder **aperiodisch**.

Fig. 24.



Ist die Dämpfung so gering, daß Schwingungen auftreten können, so wird die Entladung **oszillatorisch**. Der Schwingungskreis wird **Oszillator** genannt.

Setzen wir einen Stromkreis, in welchem, wie in Fig. 24, ein Kondensator C, eine widerstandslose Selbstinduktion L und ein induktionsfreier Widerstand R hintereinander geschaltet sind, an den Punkten A und B unter Spannung, bis der Kondensator auf das Potential E aufgeladen ist, und schließen dann den Kreis zwischen A und B, so setzt mit diesem Augenblick der Entladungsstrom J ein. Die Spannung E an den Belegungen des Kondensators, welche den Strom aussendet, ist dann in jedem Augenblick gleich der arithmetischen Summe aus der Spannung an den Enden des Widerstandes R und der Gegenspannung der Selbstinduktion. Die erstere ist nach dem Ohmschen Gesetz gleich $R . J$, die letztere nach der Gleichung [23] gleich $L \frac{dJ}{dt}$, so daß zu schreiben ist:

$$E - L \frac{dJ}{dt} - RJ = 0 \quad \ldots \ldots \quad [45]$$

Aus dieser Gleichung ergeben sich nach der im Anhange gegebenen Lösung folgende Beziehungen:

$$E_{mom} = E_{max} \cos(2\pi \nu t) . e^{-\alpha t} \quad \ldots \ldots \quad [46]$$

$$J_{mom} = \frac{E_{max}}{2\pi \nu L} \sin(2\pi \nu t) . e^{-\alpha t} \quad \ldots \ldots \quad [47]$$

$$\text{worin} \quad \alpha = \frac{R}{2L} \quad \ldots \ldots \quad [48]$$

$$2\pi\nu = \sqrt{\frac{1}{CL} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad \ldots \ldots \quad [49]$$

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{CL} - \frac{R^2}{4L^2}}} \quad \ldots \ldots \quad [50]$$

Die Gleichungen [46] und [47] bestätigen zunächst, daß sich die Spannung an den Kondensatorplatten und die im Schwingungskreise fließenden Ströme sinusförmig ändern, denn $\cos(2\pi\nu t)$ ist gleich $\sin\left(2\pi\nu t + \frac{\pi}{2}\right)$. Beide

Größen sind aber außerdem abhängig von dem Faktor $e^{-\alpha t}$. In diesem Ausdruck sind e und α konstante Zahlen; e ist die Basis der natürlichen Logarithmen, während der Wert von α nach Gleichung [48] durch R und L bestimmt wird. Die Zeit t nimmt dauernd zu. Daher wird auch αt stetig größer und mithin $e^{-\alpha t}$ stetig kleiner. Die Gleichungen [46] und [47] besagen daher, daß die Werte von E und J sich zwar nach dem Sinusgesetz ändern, daß sie aber stetig kleiner werden. In dem Faktor $e^{-\alpha t}$ ist also die Dämpfung ausgedrückt, welche der Höchstwert der Schwingungen durch den Widerstand des Schwingungskreises erleidet. Welche Rolle der Widerstand in seinem Verhältnis zur Selbstinduktion des Kreises hierbei spielt, ergibt die Gleichung [48]. Je größer R unter sonst gleichen Umständen ist, um so größer ist α, um so größer ist also die Dämpfung. Durch eine gleichzeitige Vermehrung der Selbstinduktion könnte dem Anwachsen von α allerdings begegnet werden. Für die Praxis der drahtlosen Telegraphie ist hohe Selbstinduktion im Schwingungskreise aber nicht immer angenehm. Nach Gleichung [24 a] stehen die Selbstinduktion und die Stromstärke in umgekehrtem Verhältnis zueinander. Daher wird durch eine Vergrößerung der Selbstinduktion die im Oszillator hin und her schwingende Elektrizitätsmenge verringert, die Energie der Schwingungen also vermindert. Da nun andererseits nach Gleichung [31] die Stromstärke im Oszillator mit seiner Kapazität wächst, wird man in den meisten Fällen zur Erzielung kräftiger Wirkungen den Wert von L klein und dafür den von C entsprechend größer wählen. Je kleiner aber L wird, um so mehr muß man nach Gleichung [48] bestrebt sein, auch R recht klein zu machen, um unnötige Energieverluste durch Dämpfung zu vermeiden.

Der im Schwingungskreise vorhandene Widerstand bedingt aber nicht allein eine Dämpfung der Schwingung, sondern beeinflußt auch die Schwingungsdauer, denn nach der Gleichung [50] ist auch T von R abhängig. Wird R z. B. so gewählt, daß $\frac{R^2}{4L^2} > \frac{1}{CL}$, also $R^2 > 4\frac{L}{C}$ ist, so wird der Wurzelwert in der Gleichung (50] imaginär. Für T erhalten wir also keine reellen Werte, d. h. in diesem Falle treten keine Schwingungen auf und die Entladung wird kontinuierlich. Wird dagegen $R^2 < 4\frac{L}{C}$, so hat T reelle Werte, die um so kleiner werden, je kleiner R ist. Wir erhalten also Schwingungen, oszillatorische Entladungen, deren Periodenzahl mit der Verminderung des Widerstandes steigt. Für den Grenzfall, daß $R^2 = 4\frac{L}{C}$ ist, ergibt sich $T = \frac{2\pi}{0} = \infty$.

Die Gleichung [42], die für den widerstandslosen Schwingungskreis gilt, wird für die Rechnung durch die Berücksichtigung des Widerstandes wesentlich unbequemer. Gelingt es jedoch, bei der Anordnung von Schwingungskreisen den Widerstand R so klein zu machen, daß in Gleichung [50] das Glied $\frac{R^2}{4L^2}$ gegen $\frac{1}{CL}$ vernachlässigt werden kann, so geht diese Gleichung in die be-

quemere Form der Gleichung [42] über, nämlich in

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{CL}}} = 2\pi\sqrt{CL}.$$

In den Figg. 25 und 26 sind einige Kurven wiedergegeben, welche den Stromverlauf für gedämpfte Schwingungen zeigen. Diese Kurven sind mit

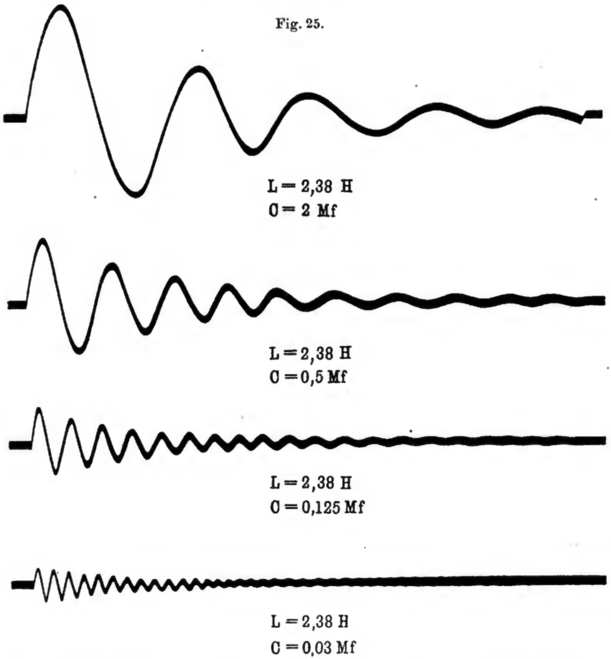


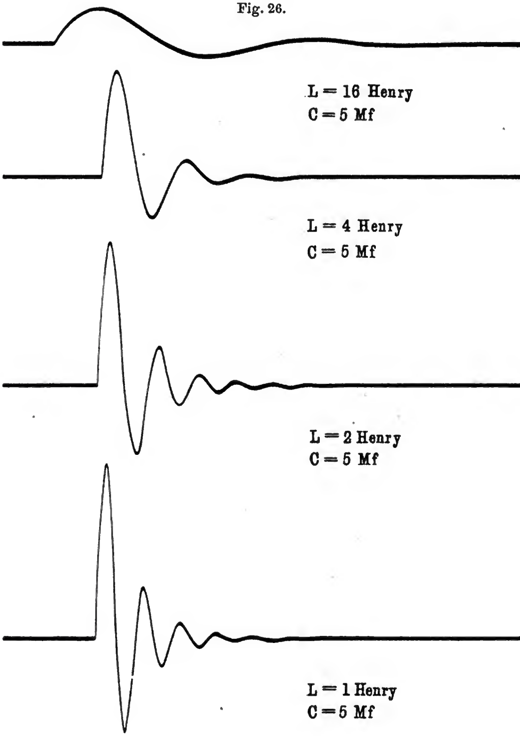
Fig. 25.

dem Oszillographen [1]) von **Siemens** u. **Halske** in einem aus einem Kondensator von 0,03 bis 5 Mf und einer Selbstinduktion von 1 bis 16 Henry ge-

[1]) Der Oszillograph verwendet die für viele elektrische Meßinstrumente ausgenutzte Ablenkung einer stromdurchflossenen Spule in einem starken magnetischen Felde. Die Spule des Oszillographen besteht in einer einzigen Schleife, die so wenig Trägheit besitzt, daß sie Wechselströmen von ziemlich hoher Periodenzahl noch leicht folgt. Mit der Spule wird ein sehr kleiner Silberspiegel gedreht, welcher einen dünnen Strahl von dem Licht einer elektrischen Bogenlampe auf eine mit lichtempfindlichem Papier belegte Walze wirft. Diese Walze wird gedreht, während

bildeten Schwingungskreise aufgenommen. Sie zeigen deutlich, wie die Ströme zwar der Sinuslinie ähnlich verlaufen, wie ihre Stärke aber immer mehr abnimmt, während die Schwingungsdauer, gemessen durch die Entfernung der gleichsinnigen Schnittpunkte mit der Nullinie, sich nicht merklich ändert. Sie geben gleichzeitig eine Bestätigung für die Richtigkeit der

Fig. 26.

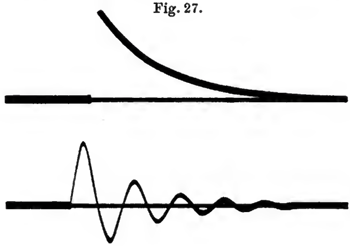


---

der Spiegel durch die zu messenden Ströme abgelenkt wird. Die Richtung der Ablenkung des Lichtstrahles und die Drehrichtung der Walze stehen senkrecht zueinander. Diese beiden Bewegungen setzen sich daher zu Kurven zusammen, welche den Verlauf der gemessenen Ströme wiedergeben. (Näheres über den Oszillographen von Siemens u. Halske ist in der E. T. Z., Berlin 1905, S. 392, zu finden.)

Formel $T = 2\pi\sqrt{CL}$, indem sie zeigen, wie die Zahl der in derselben Zeit erfolgenden Schwingungen mit der Verminderung sowohl der Kapazität als auch der Selbstinduktion zunimmt. Die Schwingungen in Fig. 26 sind wesentlich stärker gedämpft als die in Fig. 25. Die Werte für C und L sind abgerundet.

Fig. 27.



Die folgende Fig. 27 zeigt auf der oberen Linie die mit dem Oszillographen aufgenommene Kurve einer kontinuierlichen Entladung; im Entladekreise befindet sich ein hoher Widerstand. Dieser ist danach so lange vermindert worden, bis die Entladung den durch die untere Kurve angegebenen oszillatorischen Verlauf genommen hat.

IX. Die schnellen Schwingungen.

Der Leydener Flaschen-Kreis. Schwingungen der im Kondensatorkreise entstehenden Art sind es, deren sich die elektrische Wellentelegraphie bedient, um in den Weltenraum elektromagnetische Erregungen hinauszusenden, die an fernen Stellen Zeichen hervorbringen, d. h. Arbeit leisten sollen. Die Periodenzahl der in den Figg. 25 und 26 gezeichneten Schwingungen berechnet sich nach Gleichung [41], die in folgender Form zu schreiben ist,

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{CL}} \quad \dots\dots\dots \quad [51]$$

auf rund 20 bis 600 in der Sekunde. Mit so langsamen Schwingungen arbeitet die drahtlose Telegraphie aber nicht.

Um Schwingungszahlen von der Größenordnung einer Million und mehr zu erzeugen, müssen Kapazität und Selbstinduktion, damit ihr Produkt $C.L$ hinreichend klein wird, Verhältnisse annehmen, wie wir sie in der Telegraphen- und Fernsprechtechnik sonst nur selten antreffen.

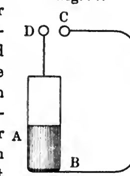
In der Technik der drahtlosen Telegraphie wird die Kapazität häufig in Zentimetern (cm), also im elektrostatischen Maße angegeben. Da wir aber die anderen Größen bereits durch die praktischen Einheiten des elektromagnetischen Maßsystems ausgedrückt haben, nämlich die Selbstinduktion in Henry, die Spannung in Volt, die Stromstärke in Ampere, so müssen wir in unsere Formeln als Einheit der Kapazität das Farad oder das Mikrofarad einführen. Nun sind $9 \cdot 10^{11}$ cm $= 1$ Farad $= 10^6$ Mikrofarad (Mf). Es ist also gleichbedeutend, ob eine Kapazität mit 0,001 Mf oder mit 900 cm angegeben wird, denn 0,001 Mf, d. i. $0{,}001 \cdot 10^{-6}$ oder $1 \cdot 10^{-9}$ Farad sind $(1 \cdot 10^{-9})(9 \cdot 10^{11})$ oder 900 cm.

Wird eine Leydener Flasche von der Kapazität $1 \cdot 10^{-9}$ Farad mit einem einfach gebogenen Drahte verbunden, dessen Selbstinduktion etwa $1 \cdot 10^{-5}$ Henry

beträgt, so berechnet sich die Periodenzahl ν nach Gleichung [51] auf $\nu = \frac{1}{2\pi . \sqrt{(1 . 10^{-9})(1 . 10^{-5})}}$, d. i. auf rund 1 600 000. Derartige Schwingungen werden als schnelle Schwingungen bezeichnet.

Die Anordnung eines solchen Schwingungskreises zeigt Fig. 28. Wird diesem Kreise zur Ladung der Leydener Flasche an den Punkten C und D eine Spannung zugeführt, der Kreis sodann durch die Verbindung der Punkte C und D geschlossen, so setzen die Schwingungen sofort ein. Infolge der Dämpfung büßen sie aber an Energie immer mehr und mehr ein und hören sehr bald ganz auf. Wollen wir von neuem Schwingungen erzeugen, so müssen wir die Punkte C und D wieder trennen, die Leydener Flasche wieder aufladen und dann den Kreis bei CD wieder schließen, und dieses müßten wir, um eine ununterbrochene Folge elektromagnetischer Kondensatorschwingungen zu erzielen, in sehr schnellem Wechsel stetig wiederholen. Eine solches leistende Schaltvorrichtung zum rechtzeitigen Schließen und Öffnen des Schwingungskreises bietet die Leydener Flasche selbst. Übersteigt nämlich die Spannung an den Belegungen des Kondensators einen bestimmten Wert, so springt zwischen den Punkten C und D ein Funke über. Dieser Funke, aus heißen Gasen und unendlich kleinen glühenden Metallteilchen bestehend, wird, wenn er einmal ausgelöst ist, auch durch eine etwas geringere Spannung, als die Anfangsspannung war, noch aufrecht erhalten. Er bildet gewissermaßen eine leitende Brücke, auf welcher sich die Kondensatorschwingungen so lange ausgleichen, bis die Spannung unter dem Einfluß der Dämpfung so weit gesunken ist, daß der Funke erlischt.

Fig. 28.



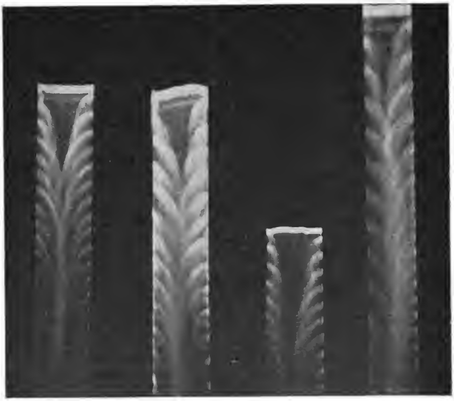
Der Entladungsfunke. Daß wirklich der Funke am Kondensator nicht nur den einmaligen plötzlichen Ausgleich der positiven und negativen Elektrizität vermittelt, sondern daß während seines Bestehens positive und negative Elektrizität fortwährend in wechselnder Richtung fließen, zeigen augenfällig die in Fig. 29 (a. f. S.) wiedergegebenen Photographien des Funkens nach Aufnahmen von Professor Batelli in Pisa. Die photographische Platte ist an dem Funken vorbei bewegt worden, und zwar so schnell, daß sehr viele Bilder des Funkens entstanden sind, die um die Dauer einer halben Schwingungsperiode auseinander liegen. Es ist deutlich zu erkennen, daß die hellste Stelle sich abwechselnd links und rechts befindet. Da es nun eine bekannte Tatsache ist, daß der Funke an der negativen Elektrode heller erscheint als an der positiven, so geht aus den Bildern hervor, daß die Polarität der Kondensatorbelegungen fortwährend gewechselt hat.

Solange der Kondensatorkreis zwischen den Punkten C und D (Fig. 28) durch den Funken geschlossen bleibt, ist die Potentialdifferenz, welche diesen Punkten von der äußeren Elektrizitätsquelle erteilt wird, so gering, daß sie für eine Erneuerung der den Schwingungen durch Dämpfung verloren gegangenen Energie nicht in Frage kommt; denn die äußere Elektrizitätsquelle ist während dieser Zeit durch den Funken kurz geschlossen. Sie gelangt jedoch wieder zur Geltung, sobald der Funke abreißt, indem sie den Kondensator

wieder auflädt, bis ein neuer Funke einsetzt. Die Abschlußkugeln bei *C* und *D* bilden hiernach die Elektroden einer Funkenstrecke.

Die Ladung des Leydener Flaschen-Kreises durch den Induktionsapparat. Einfluß der Dämpfung. Die Spannung, welche zur Einleitung des Funkens erforderlich ist, richtet sich nach der Entfernung der Elektroden *C* und *D*. Bei kugelförmigen Elektroden sind für jedes Millimeter Luftabstand etwa 3000 Volt erforderlich. Diese Spannungen einer Batterie zu entnehmen, wäre sehr unwirtschaftlich; eher kämen Dynamomaschinen in Frage. Diese werden jedoch zurzeit für so hohe Spannungen noch nicht gebaut, wenigstens nicht in einer Ausführung, daß sie den Wettbewerb mit anderen Hilfsmitteln aushalten könnten. Hohe Spannungen zu liefern ist

Fig. 29.



jedoch ein Induktionsapparat geeignet: Der Induktionsapparat besteht im wesentlichen aus einer über einen Eisenkern gewickelten Spule aus dickem Draht mit wenigen Windungen, der primären Spule, über welche eine zweite, die sekundäre Spule, gelegt ist, welche aus vielen Windungen dünnen Drahtes besteht. Ein in die primäre Spule gesandter, in rascher Folge unterbrochener Gleichstrom erzeugt bei jeder Unterbrechung in der sekundären Spule hohe Spannungen. Die Wirkungsweise und den Bau der Induktionsapparate werden wir später eingehend behandeln. Die vom Induktionsapparat gelieferten Spannungen treten in Perioden auf, deren Länge von der Häufigkeit der Unterbrechungen im Primärkreise abhängt. Bisher ist es nicht gelungen, die Zahl dieser Unterbrechungen wesentlich über 1000 in der Sekunde zu steigern; viele Unterbrecher liefern sogar nur 30 bis 60 Unterbrechungen. Im günstigsten Falle stehen uns also hohe Spannungen von Induktorien in Zeitabständen von etwa $\frac{1}{1000}$ Sekunde zur Verfügung.

Viel kürzere Zeit dauern aber die mit dem Funken eingeleiteten und unterhaltenen Kondensatorschwingungen.

Wir wollen einen Leydener Flaschen-Kreis mit der oben auf S. 39 berechneten Schwingungszahl annehmen, der eine Selbstinduktion von $L = 10^{-6}$ Henry besitze. Der Widerstand des Schwingungskreises, dem wir den Widerstand des Funkens selbst hinzurechnen müssen, weil dieser doch den Stromweg schließt, sei gleich 2 Ohm, und die Spannung, auf welche ein Induktorium die Belegungen des Kondensators auflädt, betrage 50 000 Volt. Nach der Gleichung [46] läßt sich berechnen, welche Werte die Spannung an den Kondensatorbelegungen während des Ausgleichs der Schwingungen zu jeder Zeit t, vom Einsetzen des Funkens an gerechnet, besitzt. Wenn wir für α aus Gleichung [48] den Bruch $R/2L$ schreiben, lautet die Gleichung [46]:

$$E = E_{max} \cos(2\pi\nu t) \, . \, e^{-\frac{R \, . \, t}{2L}} .$$

Nun setzen wir die Zahlenwerte ein, $E_{max} = 50\,000$, $e = 2{,}718\,282$, $R = 2$ und $L = 10^{-6}$ und berechnen E für verschiedene Zeitwerte t, die wir so wählen wollen, daß E in dem betreffenden Augenblick gerade seinen Höchstwert besitzt. Das ist der Fall, jedesmal wenn $\cos(2\pi\nu t)$ gleich Eins ist. Dies tritt ein: wenn t Null wird, oder der Zeit T einer Periode oder einem Vielfachen von T gleich ist. Wählen wir also $t = 0$, T, $2T$, $3T$ usw., so entspricht das, in Sekunden ausgedrückt, Zeitwerten von 0, $\frac{1}{1\,600\,000}$, $\frac{2}{1\,600\,000}$, $\frac{3}{1\,600\,000}$ usw. Sekunden. Werden in die Gleichung nacheinander diese Zahlenwerte eingesetzt, so ergeben sich für E die in der dritten Spalte der folgenden Tabelle zusammengestellten Werte in abgerundeten Zahlen:

Zeit		Kondensatorspannung E in Volt	
in Perioden	in Sekunden	für $R = 2$	für $R = 1$
0	0	50 000	50 000
1	$\frac{1}{1\,600\,000}$	26 800	36 600
2	$\frac{2}{1\,600\,000}$	14 300	26 800
3	$\frac{3}{1\,600\,000}$	7 700	19 600
4	$\frac{4}{1\,600\,000}$	4 100	14 300
5	$\frac{5}{1\,600\,000}$	2 000	10 500
6	$\frac{6}{1\,600\,000}$	1 200	7 700
7	$\frac{7}{1\,600\,000}$	630	5 600
8	$\frac{8}{1\,600\,000}$	330	4 100
9	$\frac{9}{1\,600\,000}$	180	3 000
10	$\frac{10}{1\,600\,000}$	100	2 000

In der vierten Spalte der umstehenden Tabelle sind die entsprechenden Werte für den Fall eingetragen, daß der Widerstand des Schwingungs-

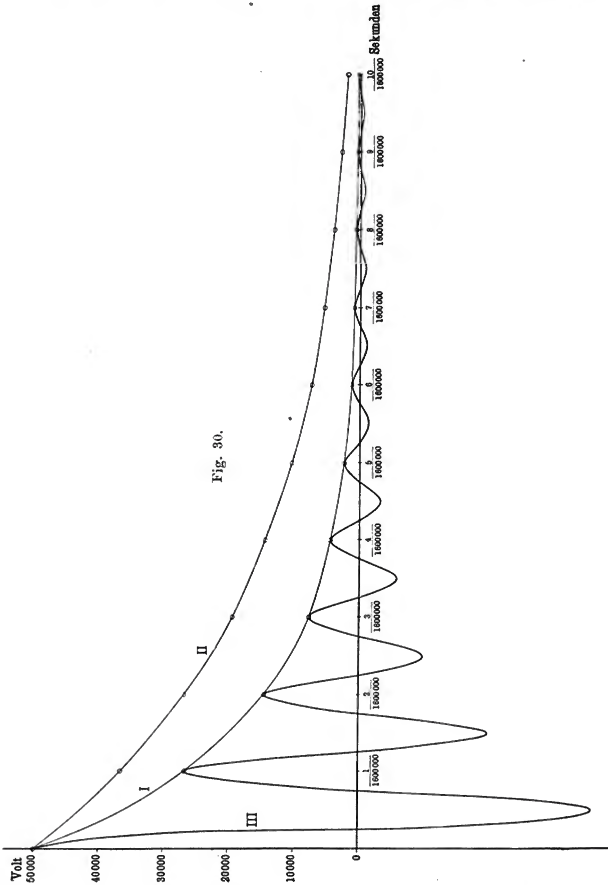


Fig. 30.

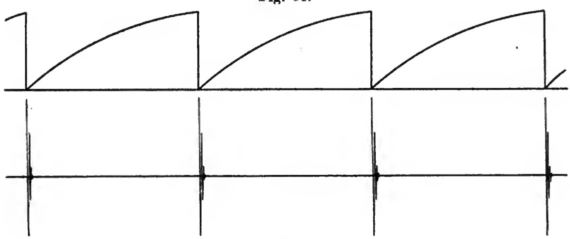
kreises nur 1 Ohm beträgt. Unter diesen Wert wird sich der Widerstand nicht wesentlich vermindern lassen, weil der Widerstand der Funkenstrecke

in Kauf genommen werden muß, welcher sich in dieser Größenordnung bewegt[1]).

Tragen wir die Zeiten als Abszissen und die Werte der Spannung aus der dritten und vierten Spalte als Ordinaten in ein rechtwinkliges Koordinatensystem ein, so erhalten wir die in Fig. 30 gezeichneten Kurven I und II, welche zeigen, wie schnell die Höchstwerte der Spannung abnehmen. Entsprechend der Kurve I gibt die Kurve III den Verlauf der Wechselspannung an. Aus den Figg. 25 und 26 auf S. 36 und 37 ist dieses Bild als das der gedämpften Schwingungen bereits bekannt. In der Zeichnung Fig. 30 ist keine Rücksicht darauf genommen, daß auch die Periodenzahl und somit die Dauer einer Schwingung durch die Dämpfung allmählich verkleinert wird, weil diese Einwirkung wegen ihrer Geringfügigkeit vernachlässigt werden soll.

Die Kurven und die Tabelle lehren uns, daß eine Verminderung des Widerstandes im Schwingungskreise um die Hälfte seines Wertes auch die Dämpfung auf die Hälfte vermindert: wenn $R = 2$ (Kurve I) ist, erreicht die Spannung einen Wert von rund 2000 Volt nach 5 Perioden, im anderen

Fig. 31.



Falle, wenn $R = 1$ (Kurve II) ist, erst nach 10 Perioden. Weiter erkennen wir, daß die Gesamtdauer der Schwingungen außerordentlich gering ist; denn da die Spannung schnell sinkt, wird der Funke sehr bald abreißen und die Strombahn für den Ausgleich der Schwingungen schon nach einer außerordentlich kurzen Zeit unterbrochen sein; in unserem Beispiel, Kurve I, wird dies schon nach 5 bis 6 Perioden von je $\frac{1}{1\,600\,000}$ Sekunde Dauer, also schon nach etwa $\frac{5}{1\,600\,000}$ Sekunden eintreten.

Ein Induktorium ist nach den vorstehenden Erörterungen nicht im stande, eine ununterbrochene Reihe von Schwingungen zu unterhalten. Der Vorgang in einem durch ein Induktorium gespeisten Schwingungskreise mag durch die in Fig. 31 gegebene Zeichnung angedeutet werden. Die Kurven auf der oberen Linie stellen das Ansteigen der Induktorspannung dar. Diese Form des Anstieges entspricht nicht ganz der Wirklichkeit; hier soll lediglich veranschaulicht werden, daß auf irgend eine Weise die Spannung zwischen den Endpunkten der sekundären Induktorspule allmählich einen Höchstwert

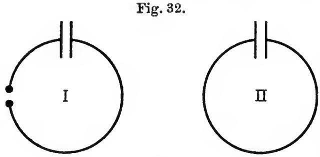
[1]) Vgl. z. B. K. Simons, Ann. d. Phys. **13**, 1044 (1904).

erreicht, welcher in dem Augenblick, wo der Funke entsteht, plötzlich auf Null sinkt, weil der Funke die Enden der Spule kurz schließt. Nach dem Abreißen des Funkens steigt die Spannung wieder langsam an. Mit dem Funken setzt jedesmal eine Anzahl von Schwingungen ein, die infolge der Dämpfung jedoch sehr bald wieder aufhören. Diese sind auf der unteren Linie angedeutet. Die von den Funken ausgelösten Wellenzüge haben eine gegenüber der zwischen zwei Funken gelegenen Zeit so außerordentlich geringe Dauer, daß sie in unser Bild kaum maßstäblich eingezeichnet werden können.

X. Übertragung elektromagnetischer Schwingungen auf einen zweiten Kondensatorkreis.

Erzwungene Schwingungen. Resonanz zwischen zwei Kondensatorkreisen. Die elektromagnetischen Schwingungen in dem Kondensatorkreise üben, wie jeder andere Wechselstrom, durch die Erzeugung eines magnetischen Wechselfeldes Induktionswirkungen aus. Ordnen wir, wie Fig. 32 zeigt, in der Nachbarschaft eines Schwingungskreises einen zweiten an und erregen wir den ersten mit einem Induktorium, so erzeugen die übertretenden magnetischen Kraftlinien in dem zweiten Kreise eine Spannung, welche, der Frequenz der Schwingungen entsprechend, periodisch wechselt. In Zeiträumen, die genau den Perioden der primären Schwingungen gleich sind, wird der zweite Kondensator abwechselnd positiv und negativ geladen. Das System II wird also durch die Induktionswirkungen aus dem System I gezwungen, in gleichem Rhythmus mit diesem zu schwingen. Es entstehen in ihm erzwungene Schwingungen. Sobald der Kondensator II geladen ist, entstehen aber in dem Kreise II noch andere Schwingungen, die Eigenschwingungen dieses Kreises, deren Periodenzahl nach der Gleichung [42] durch die Kapazität und die Selbstinduktion des Systems II bestimmt ist. Durch die vom Kreise I ausgehende Anregung werden im Kreise II also zweierlei Schwingungen erregt: die erzwungenen Schwingungen und die Eigenschwingungen. Die Periodenzahl beider kann dadurch gleich gemacht werden, daß Selbstinduktion und Kapazität im primären oder im sekundären Kreise verändert werden. Im ersten Falle würde die Periodenzahl der erzwungenen, im letzteren diejenige der Eigenschwingungen sich ändern. Solange sie für beide verschieden ist, werden die Schwingungen nicht immer in gleichem Sinne zusammentreffen. Während z. B. die langsamere Schwingung noch positiven Wert hat, kann die schnellere schon negativ geworden sein und die Wirkung der ersteren wieder aufheben. Die gegenseitige Beeinträchtigung beider Schwingungen ist um so größer, je größer der Unterschied in der Dauer ihrer Periode ist. Je mehr sich aber die Schwingungszahlen einander nähern, um so stärker wird die Gesamtwirkung. Besitzen beide dieselbe Periodenzahl, so verlaufen die Eigenschwingungen des Kreises II und die ihm aufgezwungenen Schwingungen stets in gleichem Rhythmus und

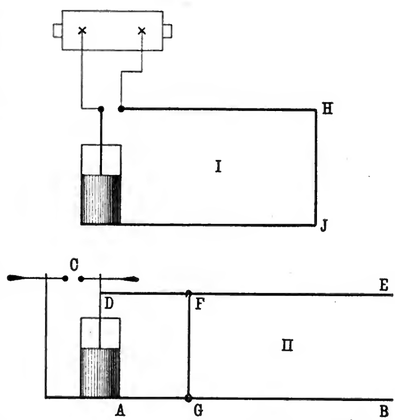
Fig. 32.



in demselben Sinne. Sie addieren sich daher in jedem Augenblick. Die von einer Schwingung des Primärkreises auf den Kreis II induzierte Schwingung dauert noch an — wiewohl geschwächt infolge der Dämpfung —, wenn die Wirkung der zweiten Schwingung in dem Kreise II ankommt. Durch diese wird die induzierte Schwingung verstärkt und ebenso durch jede folgende vom Kreise I aus wirkende Schwingung. Es ist dies das Kennzeichen der Resonanz zwischen beiden Schwingungssystemen. Gleichwie eine Schaukel, der man mit dem Beginn jeder Schwingung einen leichten Stoß erteilt, immer weiter ausschwingt und zuletzt so weit, wie man es durch einen einzigen Stoß selbst mit der Aufbietung aller Kraft niemals erreichen würde, erweitert sich auch die Schwingung des sekundären Kreises unter dem Einfluß der periodisch in ihrem eigenen Rhythmus wiederkehrenden Anregungen aus dem primären Kreise zu immer kräftigeren Wirkungen.

Resonanzversuche von Lodge. Resonanzkurven. Ein nach der Anordnung von Lodge ausgeführter Versuch bestätigt unsere Überlegung. In Fig. 33 wird der Schwingungskreis I durch das Induktorium erregt; er wirkt als Oszillator. In dem empfangenden System II, dem Resonator, liegt parallel zu der Leydener Flasche die Funkenstrecke C. Diese ist so eingerichtet, daß der Abstand der beiden Elektroden verändert und ihre Entfernung an einer Skala gemessen werden kann. Von der inneren Belegung geht der Draht DE, von der äußeren der Draht AB aus. Beide werden durch einen verschiebbaren Bügel FG verbunden. Die aus dem Kreise I in II induzierte Spannung erzeugt einen Funken bei C. Der Abstand, auf welchen die Elektroden gebracht werden können, bis ein Funke eben noch überspringt, gibt einen Maßstab für die Größe der induzierten Spannung. Durch das Verschieben des Steges FG kann nun die Selbstinduktion und damit die Eigenschwingungszahl des Systems II verändert werden. Da die beiden Systeme sonst genau gleichartig gebaut sind, stimmen sie in ihrer Eigenschwingungszahl dann überein, wenn FG so eingestellt wird, daß die Abstände DF und AG ebenso lang sind wie die entsprechenden Drähte des Systems I. Ist diese Bedingung erfüllt, so werden im System II bei C die längsten Funken erzielt. Die Energie der Schwingungen ist also in diesem

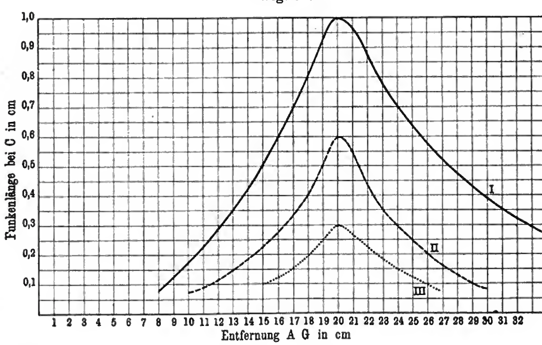
Fig. 33.



Falle am größten; *FG* befindet sich in der Resonanzlage. Wird *FG* aus dieser Lage nach links oder rechts verschoben, so zeigt das Verschwinden der Funken die Verminderung der Schwingungsenergie an. Um trotz der veränderten Lage des Steges *FG* wieder Funken zu erhalten, müssen die Elektroden der Funkenstrecke einander genähert werden.

Tragen wir die Länge der Funkenstrecke als Funktion der Drahtlänge *AG* in ein rechtwinkliges Koordinatensystem ein, so erhalten wir die in Fig. 34 wiedergegebene Kurve I, eine Resonanzkurve, welche zeigt, in welchem Maße die Energie der Schwingungen mit der Verstimmung der Selbstinduktion im Kreise II abnimmt. Die Resonanzlage des Steges *FG* (Fig. 33) wird hierbei lediglich durch die Selbstinduktion des Kreises *DFGA*, nicht etwa durch dessen Widerstand bestimmt. Ersetzen wir den Draht *FG* z. B. durch einen Graphitstift von höherem Widerstand, so erhalten wir die Resonanz wieder bei derselben Stellung des Bügels wie vorher. Gleich-

Fig. 34.



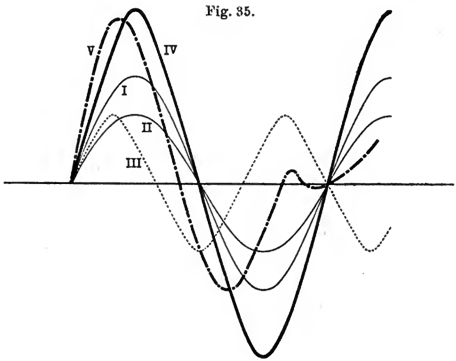
zeitig aber erkennen wir die dämpfende Wirkung des Widerstandes, denn die Funken bei *C* sind durchweg bedeutend schwächer geworden. Ihre Schlagweite wird noch geringer, wenn wir auch im Erregerkreise den Widerstand in ähnlicher Weise erhöhen. Infolge der hierdurch vermehrten Dämpfung verlieren die Schwingungen an Energie und üben daher auf den Resonator eine verminderte Wirkung aus. Die Fig. 34 gibt unter II den Verlauf der Resonanzkurve für den Fall, daß der Widerstand des Empfängers vermehrt wird, unter III für den Fall, daß außerdem auch die erregenden Schwingungen stärker gedämpft werden. Alle drei Kurven zeigen die Resonanzspitze bei derselben Abszisse; die Energie nimmt jedoch mit der Einschaltung von Widerstand ab. Je mehr Widerstand die Schwingungskreise enthalten, um so flacher verläuft die Resonanzkurve, um so undeutlicher ist die Resonanzlage zu erkennen, um so weniger genau wird die Abstimmung der beiden Kreise. Für den Erreger wie für den Empfänger ist es daher von außerordentlicher Wichtigkeit, den Widerstand so gering wie möglich zu halten.

Nach den Seiten hin nähern sich die Resonanzkurven einander immer mehr, weil, wenn der Bügel *FG* (Fig. 33) von der Resonanzlage weiter absteht, die Wirkung des Widerstandes hinter der immer mehr an Übergewicht gewinnenden Ungleichheit der Selbstinduktion der beiden Kreise zurücktritt.

Dieser von Lodge angegebene Resonanzversuch ist bei der Konstruktion von Apparaten, den Wellenmessern, verwertet worden, welche dazu dienen, die Schwingungsdauer eines gegebenen Systems zu bestimmen.

Weitere Erläuterung der Resonanz. Die vorstehenden Erörterungen über Resonanz erklären das, was bei der ersten Erwähnung der Resonanz (S. 30) angeführt worden ist, daß nämlich bei der nach Fig. 21 (S. 28) getroffenen Anordnung der Strom im Kondensatorkreise dann am größten wird, wenn die Kapazität und die Selbstinduktion sich mit der Periodenzahl des von der Maschine gelieferten Wechselstromes in Resonanz befinden. Der

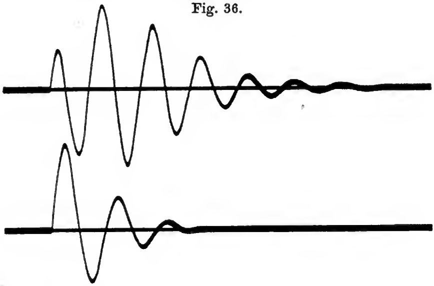
Fig. 35.



Kondensator bildet mit der Selbstinduktion einen Schwingungskreis von einer durch die Werte *C* und *L* bestimmten Eigenperiode. Beim Anlegen an die Maschine wird der Kondensator geladen, und sofort setzen in diesem Kreise die Eigenschwingungen ein. Andererseits lädt der Maschinenstrom den Kondensator im Rhythmus seiner Periode abwechselnd positiv und negativ und zwingt ihm so Schwingungen von fremder Periode auf. Solange sich die Eigenschwingungen mit den erzwungenen nicht in Resonanz befinden, setzen sie sich, weil sie nicht immer gleichförmig mit ihnen zusammentreffen, wie Fig. 35 zeigt, zu scheinbar unregelmäßigen Schwingungen zusammen. Es sei I die Eigenschwingung des Kondensatorkreises, III eine erzwungene Schwingung von kürzerer Dauer. Die Summe beider ist durch die Linie V gegeben. Wird diese ausreichend verlängert, so zeigt sich, daß dieselben Formen zwar periodisch wiederkehren, jedoch wird keineswegs eine sinusförmige Schwingung erreicht. Auch bleiben die aufeinander folgenden Höchstwerte der positiven und negativen Stromteile hinter den entsprechenden

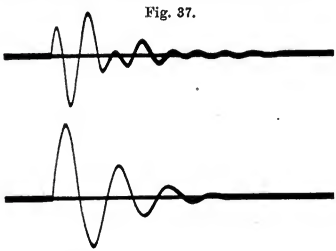
der Kurve IV — zum Teil sehr erheblich — zurück. Die Kurve IV ist die Summe der Eigenschwingung I und der erzwungenen Schwingung II von gleicher Periode, also diejenige Schwingung, welche bei Resonanzabstimmung des Kondensatorkreises auf die Periodenzahl des Maschinenstromes entsteht. Sie zeigt regelmäßigen, sinusförmigen Verlauf und dauernd die größten Höchstwerte. Bei Resonanz ist die Schwingung also am kräftigsten.

Fig. 36.



In den Figg. 36 und 37 sind einige mit dem Oszillographen aufgenommene Kurven wiedergegeben, welche die Wirkung der Resonanz veranschaulichen. Der Oszillograph besitzt zwei solcher Drahtschleifen mit Spiegel, wie auf S. 36 eine beschrieben ist. Durch die eine Schleife sind die Schwingungen eines Oszillators gesandt worden, durch die andere die von diesem Oszillator in einem benachbarten Resonator erregten Schwingungen. In beiden Abbildungen befindet sich die Oszillatorkurve auf der unteren Linie. Der Resonator ist zunächst auf Resonanz abgestimmt worden. Fig. 36 zeigt deutlich, wie die Schwingung allmählich kräftiger wird, obwohl die primäre Schwingung infolge ihrer Dämpfung sehr schnell abklingt. In Fig. 37 ist der Resonator ein wenig gegen den Oszillator verstimmt. Die Oszillatorkurve stimmt mit derjenigen der vorigen Abbildung in Höhe und Wellenlänge überein. Die Resonatorkurve steigt jedoch bei weitem nicht so hoch an wie im vorigen Falle, woraus hervorgeht, daß die Spannung der sekundären Schwingung jetzt viel geringer ist. Während im Resonanzfall die sekundäre Schwingung regelmäßig langsam anschwillt und wieder abklingt, zeigt ihre Kurve im anderen Falle einen ungleichmäßigen Verlauf. Je nachdem ihre Ausbiegungen mit den gleichsinnigen der Oszillatorkurve zeitlich einander näher liegen oder nicht, steigt sie abwechselnd höher und weniger hoch an.

Fig. 37.



XI. Offene Oszillatoren.

Unterschied zwischen der Fernwirkung des geschlossenen und des offenen Oszillators. Werden in einem nach Fig. 38 geschalteten Kondensatorkreise Schwingungen erzeugt, so üben diese nur auf kurze Entfernungen Induktionswirkungen aus. Der Grund hierfür liegt darin, daß die Schwingungen eine fast geschlossene Kreisbahn durchlaufen. In bezug auf einen entfernten Punkt *P* fließen deshalb die Ströme in den beiden Oszillatorhälften in entgegengesetzter Richtung, wie es die Pfeile andeuten. Bei einem bestimmten Abstande des Oszillators von *P* wird die Induktion der einen Kreishälfte auf einen in *P* befindlichen Leiter durch diejenige der anderen aufgehoben.

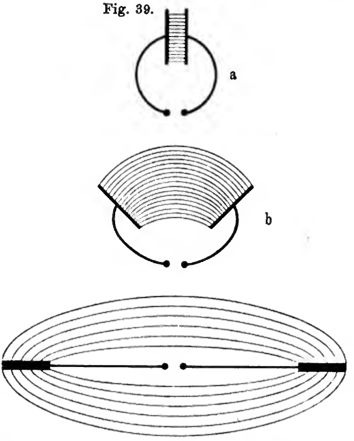
Fig. 38.



Die Fernwirkung kann aber durch Veränderungen am Kondensator wesentlich verstärkt werden.

Die Kraftlinien des elektrischen Feldes verlaufen zwischen den Kondensatorplatten, wie Fig. 39 a darstellt, in der Hauptsache senkrecht; der den Kondensator umgebende Raum ist frei davon. Entfernen wir aber die beiden Kondensatorplatten weiter voneinander (Fig. 39 b), bis sie schließlich in einer Ebene liegen (Fig. 39 c), wobei die Verbindungsdrähte ganz gerade zu biegen sind, so wird die Fernwirkung des Schwingungskreises wesentlich verstärkt. In bezug auf einen entfernten Punkt ist jetzt die Stromrichtung in dem ganzen Leitergebilde dieselbe; alle Teile des Leiters wirken also auf diesen Punkt in demselben Sinne induzierend ein. Bei einer solchen Anordnung des Kondensators treten die Kraftlinien immer weiter hinaus und verursachen eine Ausstrahlung der elektrischen Kraft in den freien Raum.

Fig. 39.



Schwingungen im stabförmigen Oszillator. Bevor wir auf den Verlauf der Kraftlinien in der Umgebung der Leiter und auf die Energiestrahlung näher eingehen, wollen wir uns zunächst mit den Vorgängen in dem Leitergebilde selbst beschäftigen. Für diesen Zweck vereinfachen wir die Anordnung dadurch, daß wir die an den Enden der Drähte noch

vorhandenen Kondensatorplatten (Fig. 39 c) immer kleiner werden lassen, bis sie schließlich in Größe und Richtung mit den Drahtenden zusammenfallen, so daß nur zwei gleich lange, an die Elektroden der Funkenstrecke angeschlossene Drähte übrig bleiben, wie es Fig. 40 zeigt. Werden die beiden Leiterhälften durch ein Induktorium aufgeladen, bis ein Funke überspringt, so spielen sich in dem System ganz ähnliche Vorgänge ab, wie in dem bisher betrachteten Kondensatorkreise. Über die Funkenstrecke fließt aus dem einen Draht die positive Elektrizität in den anderen, die negative in entgegen-

Fig. 40.



gesetzter Richtung. Dieser Strom erzeugt in der Umgebung der Leiter ein magnetisches Feld. Die Leiter selbst werden durch den Strom entladen. Ihre Spannung ist gleich Null, wenn der Strom am stärksten ist. Das elektrische Feld zwischen den Drähten hat sich in ein magnetisches verwandelt. Dieses unterhält bei seinem Verschwinden in den Leitern den Entladestrom, welcher die Drähte gleichwie die Belegungen eines Kondensators wieder auf eine der ursprünglichen entgegengesetzte Spannung auflädt. Alsdann beginnt das Spiel in umgekehrter Richtung von neuem, und wie im Kondensatorkreise erzeugen auch hier Selbstinduktion und Kapazität in ihrer Wechselwirkung elektromagnetische Schwingungen. Diese Anordnung der Leiter stellt ein *offenes* Schwingungssystem und zwar einen *stabförmigen Oszillator* dar, der zur Erzeugung und Ausbreitung der elektromagnetischen Schwingungen für die drahtlose Telegraphie eine hervorragende Rolle spielt.

Fortschreiten von Wechselstrom längs einer Drahtleitung Der offene Oszillator weist gegen den geschlossenen, den Kondensatorkreis, wesentliche Unterschiede auf. Während Kapazität und Selbstinduktion in den geschlossenen Schwingungskreisen auf einen bestimmten Teil des Kreises konzentriert sind, verteilen sie sich beim offenen Oszillator über die ganze Länge der Leiter, denn die beiden Leiterhälften sind zu gleicher Zeit die Belegungen des Kondensators und auch die Träger der Selbstinduktion. Der mit dem Einsetzen des Funkens in den Leitern fließende Strom findet, wenn an den Enden der Drähte eine Kapazität angehängt ist, wie es im geschlossenen Schwingungskreise der Fall ist und wie es Fig. 39 c (S. 49) noch zeigt, in dieser Kapazität bereitwillige Aufnahme; er strömt mit einer gewissen Stärke in die Kondensatorplatte hinein. Wird die Kapazität aber entfernt, so findet der Strom am Ende des Drahtes den Weg versperrt; er wird dort stets gleich Null sein, während er in den übrigen Teilen des Leiters zwischen positiven und negativen Werten hin und her schwingt. Der Strom tritt also nicht zu jeder Zeit in allen Teilen der Leiter in gleicher Stärke auf. Das ist indessen, wie uns die folgende Überlegung zeigen wird, ein ganz natürlicher Vorgang.

Senden wir in einen Drahtleiter einen elektrischen Strom, so bedarf es einer, wenn auch sehr kurzen, so doch meßbaren Zeit, ehe der Strom an das Ende des Drahtes gelangt. Die elektrischen Ströme pflanzen sich mit einer Geschwindigkeit von etwa 300 000 km in einer Sekunde fort, wobei zunächst

davon abgesehen werden mag, daß diese Geschwindigkeit Änderungen unterliegt, welche durch das Medium oder durch besondere Eigenschaften des Leiters bedingt werden. Am Ende einer 300000 km langen Leitung werden sich daher elektrische Ströme erst eine Sekunde später bemerkbar machen, als sie am Anfang der Leitung erregt worden sind. Wird nun die Stärke und Richtung des Stromes am Anfang der Leitung andauernd periodisch verändert, etwa durch den Anschluß der Leitung an eine Wechselstrommaschine, so wird ein stationärer Zustand niemals eintreten, denn während der einen Sekunde, welche der erste in die Leitung gesandte Stromstoß gebraucht, um bis ans Ende der Leitung zu gelangen, sind eine ganze Reihe schwächerer, stärkerer und entgegengesetzt gerichteter Stromstöße am Anfang abgesandt worden, welche sich alle nach dem Ende des Leiters hin fortpflanzen. Auf seiner ganzen Länge verteilt werden wir daher die elektrischen Ströme in allen von der Wechselstrommaschine erzeugten Phasen wellenförmig einander folgend antreffen. Hat der Wechselstrom z.B. 50 Perioden, so werden in der einen Sekunde 50 mal positive und 50 mal negative Ströme ausgesandt. Auf der ganzen 300000 km langen Strecke sind also die Stromphasen in einer Wellenlinie — bei sinusförmigen Strömen in einer sinusförmigen[1]) Wellenlinie (Fig. 2, S. 5) — angeordnet, die 50 Wellenberge und 50 Wellentäler enthält, mithin aus 50 ganzen Wellen besteht. Die Länge einer Welle, einen Berg und ein Tal einschließend, beträgt somit $\frac{300000}{50} = 6000$ km. Diesen Entfernungen gegenüber sind allerdings die Drahtlängen, welche wir bisher in unseren Stromkreisen betrachtet haben, so kurz, daß ein Unterschied zwischen den Stromstärken am Anfang und am Ende der Drähte praktisch nicht vorhanden ist. Vermehren wir jedoch die Periodenzahl des Wechselstromes, so wird die Zahl der auf der ganzen Länge von 300000 km verteilten Wellen immer größer, die Länge der einzelnen Welle immer kleiner. Ist v die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Elektrizität, d. h. ist der in 1 Sekunde zurückgelegte Weg gleich v, so entstehen, wenn ν die Periodenzahl ist, auf diesem Wege ν Wellen. Hieraus ergibt sich für die mit λ bezeichnete Länge einer dieser Wellen die Beziehung

$$\lambda = \frac{v}{\nu} \qquad [52]$$

oder

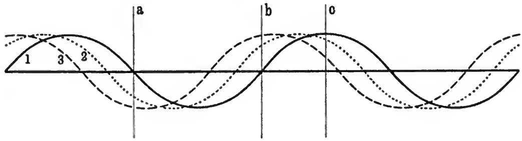
$$\nu . \lambda = v \qquad [53]$$

Nimmt ν die Werte von 1 bis zu 10 Millionen an, also Schwingungszahlen, wie sie bei Kondensatorentladungen auftreten, so verringert sich die Wellenlänge auf $\frac{300000}{1000000}$ km bis $\frac{300000}{10000000}$ km, das sind 300 bis 30 m. Mithin sind bei solchen Periodenzahlen alle Phasen eines Wechselstromes über eine Drahtlänge von 300 bis 30 m verteilt; wir dürfen daher in der elektrischen Wellentelegraphie keineswegs erwarten, an allen Stellen unserer Stromkreise zu gleicher Zeit dieselbe Stromstärke anzutreffen.

[1]) Streng genommen nur unter der Voraussetzung, daß die Verluste (Dämpfung) vernachlässigt werden.

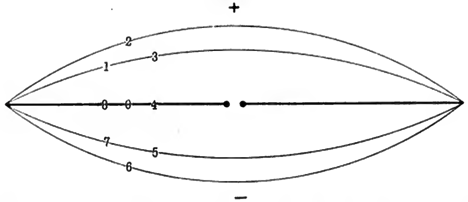
Stromverteilung im stabförmigen Oszillator. Stehende Wellen. Der im stabförmigen Oszillator beim Überspringen des Funkens einsetzende Strom läßt sich ebenfalls durch eine sinusförmige Wellenlinie darstellen. Fig. 41 zeigt, wie ein solcher Strom von z. B. 10000000 Perioden sich längs eines Drahtes fortpflanzt, den wir uns unendlich lang denken müssen. In einem bestimmten Augenblicke hat die Stromstärke, der Linie 1 entsprechend, bei den um eine halbe Wellenlänge, nämlich um 15 m voneinander entfernten Punkten *a* und *b* den Wert Null und gleichzeitig bei *c* den Höchstwert. Etwas später, nicht ganz nach einer Viertelperiode, besitzt der Strom an diesen

Fig. 41.



Stellen die Werte der Linie 2, noch etwas später diejenigen der Linie 3. Von einer Dämpfung ist hierbei abgesehen. An jedem Punkte der Leitung ziehen also alle Phasen einer Periode vorbei. Schneiden wir aus dem Leiter aber das 15 m lange Stück *ab* heraus und erregen wir in ihm Schwingungen von 10000000 Perioden durch eine in der Mitte angeordnete, an ein Induktorium angeschlossene Funkenstrecke, so sind Stromverteilungen, wie sie die Linien 2 und 3 andeuten, auf diesem Leiterteil nicht möglich; es können vielmehr nur solche vorkommen, welche der ausgezogenen Linie 1 entsprechen. Wenn der Strom fernerhin seine Stärke und Richtung stetig ändert, so muß er sich

Fig. 42.



doch immer so über den Leiter verteilen, daß er an den Enden gleich Null ist. Wie er unter solchen Verhältnissen die Periode durchläuft, zeigt Fig. 42[1]). Von Null ansteigend, erreicht z. B. der Strom nach $^1/_8$ Periode den durch die Linie 1 dargestellten Wert; nach $^1/_4$ Periode ist er bis zu seinem positiven Höchstwert (Linie 2) angestiegen; dann sinkt er wieder über Linie 3 zu Null zurück und steigt in negativer Richtung an. Nach $^5/_8$ Perioden hat er den Wert 5, nach $^6/_8$ Perioden den durch Linie 6 dargestellten negativen Höchstwert erreicht und sinkt dann über Linie 7 wieder

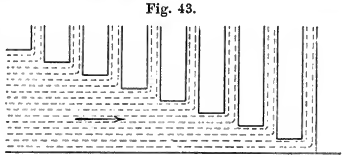
[1]) Zenneck, Elektromagnetische Schwingungen, Enke-Stuttgart, 1905, Fig. 430.

auf Null. Eine Wellenbewegung ist also vorhanden, aber nicht mehr eine fortschreitende Welle, sondern eine sogenannte stehende Welle. Es machen nicht mehr alle Punkte des Leiters alle Phasen der Stromwelle durch, sondern jedem Punkte kommt ein ganz bestimmter Teil der Wellenbewegung zu, den er immer wiederholt. In der Mitte schwingt der Strom zwischen dem positiven und dem negativen Höchstwerte; an den Enden ist er dauernd gleich Null; in den Zwischenlagen schwingt er zwischen Werten, welche kleiner als das Maximum sind und nach den Enden zu immer mehr abnehmen, die jedoch bei jeder Schwingung für denselben Punkt immer die gleiche Größe haben.

Fließt in der ersten Hälfte der Periode ein positiver Strom von links nach rechts, so fließt in der zweiten Hälfte ein negativer Strom in dieser Richtung. Das bedeutet dasselbe, als wenn wir sagen, der positive Strom fließt in der ersten Hälfte der Periode von links nach rechts, in der zweiten von rechts nach links. Wir können uns den Vorgang in dem Leiter auch so vorstellen, wie wenn die nach den Enden hin fließenden Elektrizitätsmengen dort durch das elastische Dielektrikum zurückgeworfen und immer wieder gezwungen werden, nach der Mitte zurückzukehren. Die Wellen werden an den Enden der Drähte reflektiert und rufen die Erscheinung der stehenden Wellen hervor, ebenso, wie es z. B. von Luft- und Seilschwingungen bekannt ist.

Wir haben hiermit das Bild der Stromverteilung im stabförmigen Oszillator. An den Enden herrscht stets der Strom Null, ein Stromknoten; in der Mitte pendelt der Strom zwischen den Höchstwerten hin und her, hier befindet sich ein Strombauch. Daß in der Mitte ein Maximum der Strömung vorhanden sein muß, wird auch klar, wenn man bedenkt, daß die elektrischen Massenteilchen während einer Schwingung von der einen Leiterhälfte zur anderen befördert werden müssen, um diese zu laden. Während der Ladung breiten sich die Massenteilchen über den ganzen Leiter aus; einige bleiben unmittelbar hinter der Funkenstrecke sitzen, andere in der Mitte des Stabes, andere dringen bis ans Ende vor. Je weiter sie aber dahin fortschreiten, um so geringer wird ihre Zahl. Die Stärke des Stromflusses nimmt also nach den Enden hin ab, wie es in Fig. 43 angedeutet ist. Umgekehrt nimmt sie zu, wenn die Umladung einsetzt und die elektrischen Massenteilchen der entgegengesetzten Leiterhälfte wieder zustreben. Gleichsam die einzelnen Teile auf seinem Wege sammelnd, erhält der Stromfluß stetig Zuwachs. Durch die Mitte müssen alle Teilchen wandern; hier ist der Fluß also am stärksten. Unmittelbar dahinter verliert er wieder an Kraft, weil sich einzelne Teilchen von der Strömung absondern und zur Aufladung des Leiters festsetzen.

Fig. 43.



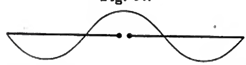
Eigenschwingung des stabförmigen Oszillators. Grundschwingung, Oberschwingungen. Würden wir den Draht *ab* in Fig. 41 (S. 52) etwas länger als 15 m machen, so wäre die in Fig. 42 gezeichnete Stromver-

teilung für einen Strom von 10000000 Perioden nicht mehr möglich, denn die durch den Abstand der Punkte a und b, also durch die Länge des Oszillators bestimmten Stromknotenpunkte, lägen dann weiter auseinander, als der gegebenen Periode entspräche. Zu jedem Werte der Periode gehört also immer eine bestimmte Drahtlänge, oder umgekehrt, die Länge der Oszillatordrähte ist bestimmend für die Länge der in ihnen entstehenden Stromwelle. Der gestreckte Oszillator besitzt also auch seine Eigenschwingung. Die längste Welle, die sich überhaupt in ihm ausbilden kann, ergibt sich, wenn die in Fig. 42 gezeichnete halbe Welle zu einer ganzen vervollständigt wird. Bezeichnen wir mit l die Länge eines Oszillatordrahtes, und setzen wir voraus, daß beide Drähte gleich lang sind, die Funkenstrecke also in der Mitte liegt, so ist die Länge der ganzen Welle

$$\lambda = 4\,l \qquad [54]$$

Eine Schwingung in dieser Wellenlänge wird als die Grundschwingung des Systems bezeichnet. Außerdem sind noch solche Oberschwingungen möglich, welche die Bedingung erfüllen, daß sich in der Mitte des Leiters ein Strombauch, an den Enden ein Stromknoten ausbildet. Dieser Forderung genügen Wellen, für welche $\lambda = {}^4/_3\,l$, ${}^4/_5\,l$, ${}^4/_7\,l$ usw. ist, wie es z. B. in Fig. 44 gezeigt wird.

Fig. 44.



Die Schwingungszahl der Grundschwingung eines gestreckten Oszillators ergibt sich aus der Gleichung [53] als $\nu = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4\,l}$ und demnach die Dauer einer Schwingung, d. i. der reziproke Wert von ν, als

$$T = \frac{4\,l}{v} \qquad [55]$$

Einfluß der Kapazität und der Selbstinduktion auf die Grundschwingung. In der vorstehenden Formel erscheinen, abweichend von der für die Schwingung im geschlossenen Kondensatorkreise abgeleiteten Gleichung [42], in welcher die Dauer einer Periode als Funktion von der Kapazität und der Selbstinduktion des Kreises bestimmt ist, die Werte C und L nicht. Trotzdem ist die Kapazität und die Selbstinduktion keineswegs ohne Einfluß auf die Schwingungsdauer, denn durch sie wird in erster Linie die Fortpflanzungsgeschwindigkeit v der Elektrizität in dem Leiter beeinflußt. Der Fortbewegung der Elektrizität in einem gestreckten Leiter setzen sich in den Wirkungen der Kapazität, der Selbstinduktion, des Ohmschen Widerstandes und der Verluste durch Ableitung Hindernisse entgegen, welche auf dem Wege durch den Leiter hindurch überwunden werden müssen. Während der Strom in einen Leiter eindringt, wird der ganze Leiter elektrisch geladen. Jedes Teilchen des Leiters wird gewissermaßen mit kleinen elektrischen Massen angefüllt, welche sich von dem Hauptstrom abzweigen. Hierdurch wird ein Teil der elektrischen Energie zurückgehalten. In ganz ähnlicher Weise wird ein anderer Teil verbraucht, um die magnetischen Kraftlinien, welche jedes Leiterteilchen umkreisen, zu erzeugen, das magnetische Feld aufzubauen; weiter wird ein Teil in Wärme umgewandelt und schließlich geht ein Teil infolge von Nebenschließungen durch Ableitung

verloren. Die Verluste durch Stromwärme und durch Ableitung lassen sich durch Verwendung von Drähten mit geringem Widerstand und durch gute Isolierung so sehr vermindern, daß sie den anderen Verlusten gegenüber zu vernachlässigen sind. Wird von ihnen zunächst abgesehen, so bleiben als bestimmend für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit nur die Kapazität und die Selbstinduktion übrig. Für einen gestreckten Drahtleiter, dessen Radius im Vergleich zu seiner Länge klein ist, gilt die Beziehung

$$v = \frac{1}{\sqrt{C'L'}} \text{ [1]} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad [56]$$

worin durch C' und L' die Kapazität und die Selbstinduktion der Längeneinheit, 1 cm, des Leiters ausgedrückt werden.

Der hiernach sich ergebende Wert für v kommt zwar für Leiter der gedachten Art, z. B. für Telegraphenleitungen, dem früher angegebenen Werte von $3 \cdot 10^{10}$ cm in der Sekunde so nahe, daß der Unterschied im allgemeinen meist vernachlässigt werden kann; streng genommen ist aber die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Elektrizität nicht in allen Leitern gleich groß. Die elektrische Wellentelegraphie darf über diese Ungleichheiten nicht hinweggehen. Der Wert $3 \cdot 10^{10}$ cm gilt genau nur für die Fortpflanzung der nach Maxwell anzunehmenden elektrischen Polarisation im reinen Äther; in Leitern äußert sich der Widerstand, welchen der den Äther umgebende Stoff jener Polarisation entgegensetzt, durch eine Verminderung des Wertes für v.

Aus den Gleichungen [55] und [56] ergibt sich

$$T = 4\, l \sqrt{C'L'} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad [57]$$

oder

$$T = 4 \sqrt{CL} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad [58]$$

wenn C und L die gesamte Kapazität und Selbstinduktion für die Leiterlänge l bedeuten. Die Kapazität und die Selbstinduktion des Leiters sind also in ganz ähnlicher Weise für die Schwingungsdauer bestimmend, wie im geschlossenen Kondensatorkreise.

Die Kapazität eines Leiters wird wesentlich durch die Lage zu seiner Umgebung beeinflußt. Ein dicht über der Erdoberfläche horizontal geführter Draht hat eine andere Kapazität, als ein senkrecht in die Luft ragender Leiter von gleichen Abmessungen. Indessen verändert auch dieser seine Kapazität, wenn größere Massen in seine Nähe gebracht werden, wenn z. B. ein Haus neben ihm errichtet wird. Sogar eine Nebelumhüllung übt schon einen merklichen Einfluß aus und vermag die Eigenschwingungszahl eines senkrecht frei ausgespannten Oszillators zu verändern.

Diese Einflüsse sind folgendermaßen zu erklären. Verbinden wir einen Leiter z. B. mit dem positiven Pol einer Elektrizitätsquelle, so wird er positiv geladen. Wird eine mit Erde verbundene Metallplatte ihm gegenüber gestellt, so verteilen sich in ihr die Elektrizitäten, die positive wird abgestoßen und zur Erde abgeleitet, die negative wird angezogen; umgekehrt wirkt die frei gewordene negative ihrerseits auch anziehend auf die positive Elektrizität des Leiters. In diesem sammelt sich daher, indem die Elektrizitätsquelle

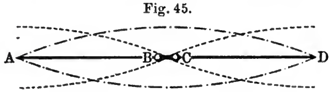
[1]) A. Sommerfeld, Ann. d. Phys. **67**, 233 (1899); G. Seibt, E. T. Z. 1902, S. 387 und M. Abraham, Phys. Zeitschr. **5**, 178 (1904).

Nachschub leistet, mehr positive Elektrizität an als vorher. Seine Aufnahmefähigkeit (Kapazität) ist also erhöht worden. Die Wirkung ist um so kräftiger, je größer die gegenübergestellte Platte ist und je näher sie dem Leiter gebracht wird.

Es bleibt zu beachten, daß die Gleichungen [57] und [58] nur für den einfachen geraden Leiter gelten. Andere Leitergebilde mit künstlich erhöhtem Selbstinduktionskoeffizienten und nicht gleichmäßig verteilter Kapazität besitzen etwas andere Grundschwingungen, als sich nach der Gleichung [58] ergeben. Die Abweichungen müssen für jede Anordnung von Fall zu Fall untersucht werden. Für die Praxis werden wir Methoden und Meßgeräte kennen lernen, welche die Wellenlänge irgend einer Schwingung in einfacher Weise zu bestimmen gestatten.

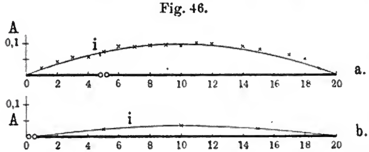
Spannungsverteilung im stabförmigen Oszillator. Während der Strom in der Mitte des stabförmigen Oszillators den stärksten Schwankungen unterliegt, verändert die Spannung an dieser Stelle ihren Wert Null kaum merklich. An den Enden der Leiter dagegen wird sie bei den periodischen Entladungen der beiden Oszillatorhälften durch den einen Stromstoß auf den positiven, durch den folgenden auf den negativen Höchstwert gebracht. Die Spannung ist also an den Enden der Drähte den größten Änderungen unterworfen. An den Enden bilden sich Spannungsbäuche, in der Funkenstrecke dagegen Spannungsknoten aus. Die Fig. 45 zeigt in den strichpunktierten Linien den Stromverlauf, in den gestrichelten die Verteilung der Spannung für die Grundschwingung; Strom und Spannung sind also um 90° in der Phase verschoben.

Fig. 45.



Unsymmetrische Anordnung der Funkenstrecke. Die Länge der im stabförmigen Oszillator erregten Welle ändert sich nicht, wenn die beiden Drahthälften des Oszillators ungleich lang sind. Die Welle der Grundschwingung ist stets doppelt so lang, als die gesamte Länge des Leitersystems. Da die beiden Drahtabschnitte durch den die Funkenstrecke periodisch überspringenden Funken zu einem ununterbrochenen Leiter verbunden werden, hat die Lage der Funkenstrecke in dem System keinen Einfluß auf die Wellenlänge, wohl aber auf die Stromstärke. Von Prof. Zenneck gezeichnete Kurven, die in Fig. 46 wiedergegeben werden[1]), zeigen, wie die Stromstärke abnimmt, je weiter die Funkenstrecke von der Mitte der Leiter entfernt liegt. Der kräftigste Strom wird erzeugt, wenn die Funkenstrecke

Fig. 46.

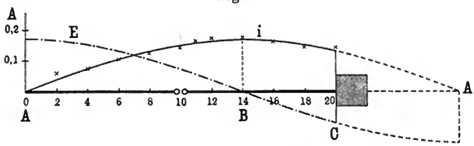


[1]) Zenneck, Elektromagnetische Schwingungen, Fig. 437 a u. b.

da liegt, wo ein Strombauch sich auszubilden strebt, d. i. in der Mitte der Leiter.

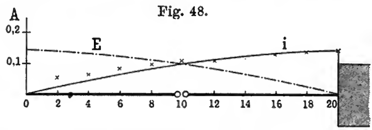
Endkapazität; Gegengewicht. Wesentlich verändert sich die Wellenlänge, wenn eine Kapazität, etwa eine Metallplatte, an den Oszillatordraht

Fig. 47.



auf einer Seite angeschlossen wird. Da in diesem Falle der Strom, wie bereits erwähnt, an dem mit der Kapazität verbundenen Ende des Leitersystems nicht gleich Null ist, ergibt sich für die Stromverteilung das in Fig. 47 durch die ausgezogene Kurve wiedergegebene Bild [1]). Der Strombauch ist nach der Kapazität hin verschoben. Die Wellenlänge erhält man aus dem durch die gestrichelte Linie ergänzten Bilde als das Doppelte der Strecke AA_1. Wird die angehängte Kapazität überwiegend groß, so verursacht sie eine Verschiebung, wie sie in Fig. 48 dargestellt ist [2]). Unmittelbar an der Kapazität, also am Ende des einen Drahtes, befindet sich jetzt der Strombauch und der Spannungsknoten. Bringen wir nun noch die Funkenstrecke an dieselbe Stelle, so erzielen wir dadurch die höchste Stromstärke und die größte Energie der Schwingung.

Fig. 48.



Wir können annehmen, daß die eine Hälfte des Oszillatorstabes durch die Kapazität ersetzt ist. In solcher Anordnung wird die Kapazität als Gegengewicht bezeichnet. Da der freie Draht jetzt in einer Viertelwelle schwingt, gilt die Gleichung [54] auch für diesen Fall.

Eine Kapazität, deren Größe ausreicht, um für stabförmige Oszillatoren beliebiger Länge als Ersatz für die eine Stabhälfte zu dienen, ist die Erde.

XII. Die Ausstrahlung elektrischer Energie durch offene Oszillatoren.

Ausstrahlung elektromagnetischer Wellen (nach Hertz). In Fig. 39 auf S. 49 ist gezeigt, wie die elektrischen Kraftlinien, längs deren sich die Kondensatorströme als Verschiebungsströme durch das Dielektrikum fortsetzen, mit der Umwandlung des Kondensatorkreises in einen stabförmigen

---

[1]) Zenneck, Elektromagnetische Schwingungen, Fig. 435. — [2]) Ebenda, Fig. 436.

Oszillator immer mehr in den umgebenden Raum hinausgreifen, wie sie immer weiter hinausgestreut werden Wenn der Oszillator die Gestalt der Fig. 40 auf S. 50 angenommen hat, die Kondensatorplatten also ganz verschwunden und an ihre Stelle die Leitungsdrähte selbst getreten sind, so werden sich die Verschiebungsströme längs des ganzen Leiters ausgleichen. Die Kraftlinien verlaufen dann nach den in Fig. 49 gegebenen Kurven; die Streuung ist am größten. Über den Verlauf und das weitere Verhalten dieser Kraftlinien hat Professor Heinrich Hertz experimentelle Untersuchungen angestellt, deren Ergebnisse wir im folgenden nach seinen eigenen Berichten [1]) kurz angeben wollen. Hertz erregte elektromagnetische Schwingungen von sehr hoher Periodenzahl mit Hilfe eines sehr kurzen, stabförmigen Erregers, des nach ihm benannten „Hertzschen Oszillators", welcher in Fig. 50 dargestellt ist. Da die Ströme der elektrischen Schwingungen fortwährend ihre Stärke und Richtung ändern, so ändern sich in demselben Sinne auch die aus dem Oszillator tretenden Kraftlinien. In dem Augenblick, in dem die

Fig. 49.

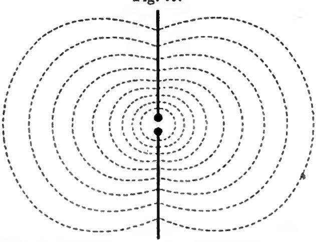
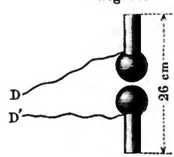


Fig. 50.



Ladung der Oszillatorstäbe Null ist, besitzen sie keine Spannung; elektrische Kraftlinien sind daher nicht vorhanden. Gleich darauf aber schießen sie aus den Leitern hervor und nehmen an Zahl dauernd zu, bis die Spannung ihren Höchstwert erreicht hat. Bei der Entladung der Drähte bilden sie sich ebenso schnell zurück, um das Spiel mit entgegengesetztem Vorzeichen von neuem zu beginnen, sobald die neue Ladung einsetzt. Während nun die von den Leitern ausgesandten Kraftlinien, nachdem die Spannung ihren Höchstwert überschritten hat, sich wieder zusammen zu ziehen beginnen, tritt eine eigenartige Erscheinung auf. Gleichsam als ob die äußersten Kraftlinien, welche sich von den Leitern am weitesten entfernt haben, durch eine gewisse Trägheit festgehalten würden, scheinen sie dem Rückzuge auf den Leiter zu nicht schnell genug folgen zu können. Wenn die dem Leiter zunächst gelegenen Teile der Kraftlinien schon wieder verschwunden sind, bleiben die entfernteren noch bestehen. An ihren Seiten bilden sich Einschnürungen, bis schließlich ein Teil der Kraftlinien sich ganz abtrennt und als geschlossener Kreis selbständig im Raume fortbesteht. Die Figg. 51 bis 55, nach den Kurvenzeichnungen von Hertz wiedergegeben, lassen diesen Vor-

[1]) H. Hertz, Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft; Ges. Abhandlungen, Leipzig, Joh. Ambr. Barth, 1892, S. 147 ff.

gang erkennen. Sie zeigen in der Mitte die Anordnung der Funkenstrecke. Von den Leitern gehen zunächst keine Kraftlinien aus; in Fig. 54 sind sie in dem Augenblick dargestellt, in welchem die Ladung gleich Null ist. Die rechts und links gezeichneten Kraftlinien rühren von früheren Schwingungen her und bleiben zunächst außer Betracht. Beginnt eine neue Schwingung, so treten die Kraftlinien aus den Leitern heraus. Die Figg. 51 und 52 zeigen, wie bei der Aufladung die Kraftlinien entstehen, sich vermehren und sich ausdehnen. In Fig. 53 sind die Kraftlinien im Begriff, sich wieder zurückzuziehen. An den Seiten erkennen wir deutlich die Einschnürung und die Stellen, an welchen sich die äußeren Ringe lostrennen werden. Diese Trennung hat sich in Fig. 54 bereits vollzogen. Während die übrigen Kraftlinien ganz zurückgetreten sind, haben sich die abgetrennten Ringe

Fig. 51.

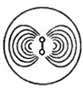


Fig. 52.

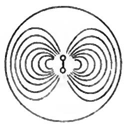
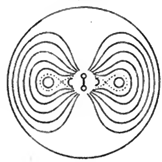


Fig. 53.



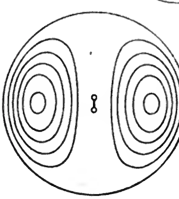


Fig. 54.

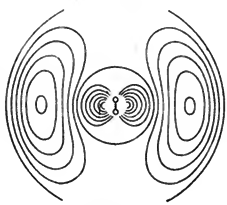


Fig. 55.

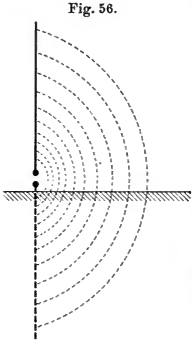
zu beiden Seiten angesammelt. Die nächste Ladung, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen, treibt neue Kraftlinien aus den Leitern heraus. Diese drängen, wie es in Fig. 55 zu sehen ist, die abgeschnürten Ringe zur Seite. Auch diese Kraftlinien lassen beim Verschwinden selbst wieder eine Anzahl von Ringen zurück. Der Vorgang wiederholt sich mit jeder Ladung und Entladung in dem schwingenden System. Immer wieder werden neue Kraftlinienbündel abgeschnürt, welche ihre Vorgänger nach allen Richtungen weiter in den Raum hinausdrängen.

Unter dem Einfluß der in der Umgebung der Leiter sich ausgleichenden Verschiebungsströme werden die Ätherteilchen polarisiert. Die Polarisation teilt sich, wie wir früher gesehen haben, den benachbarten Ätherteilchen mit und pflanzt sich so im Raume fort. Ihr Fortschreiten wird in den Hertzschen Bildern durch das Hinausdrängen der Kraftlinienringe versinnlicht. Dem einen Verschiebungsstrom folgt sofort ein anderer mit entgegengesetzter Stromrichtung, dessen Wirkung sich in der gleichen Weise fortpflanzt. Wie

die Ströme im Oszillator periodisch ihre Stärke und Richtung wechseln, so ist auch die Polarisation der Ätherteilchen von periodisch ansteigender und abfallender Stärke und wechselnder Richtung. Mithin ziehen an derselben Stelle im Raume elektrische Strömungen in periodisch wechselnder Stärke und Richtung vorüber. Die Wirkung der elektrischen Schwingungen breitet sich also im Weltenäther wellenförmig aus, ebenso wie der Wechselstrom in einem Leiter. Wir könnten diese in einer bestimmten Richtung sich vollziehende Ausbreitung durch eine sinusförmige Wellenlinie darstellen, denn es ziehen an einem Punkte im Raume die positiven und negativen Werte der elektrischen Erregung in allen Phasen einer sinusförmigen Schwingung vorüber. Die Länge der Wellen wird durch die Periodenzahl der Schwingungen, also ebenfalls durch die Gleichung [54] oder [58] bestimmt. Die Bewegung im Äther hört nicht auf, wenn auch die Schwingung im Leitersystem schon beendet ist. Wie ein aus dem Dampfrohr ausgepufftes Dampfwölkchen weiter schwebt, so teilt sich der ausgesandte Impuls den benachbarten Teilen weiter mit. Da die räumliche Ausbreitung der Energie strahlenförmig nach allen Seiten hin erfolgt, so werden auf eine Fläche von bestimmter Größe weniger Strahlen auftreffen, wenn diese Fläche von der Energiequelle weiter absteht. Bei doppelter Entfernung z. B. trifft nur der vierte Teil der Strahlen darauf. Wie bei der Ausbreitung des Lichtes die Helligkeit, ebenso nimmt die Wirkung der elektrischen Wellen mit dem Quadrate der Entfernung ab.

Die elektrischen Strömungen im Äther sind ebenso wie jeder andere Strom von einem magnetischen Kraftfelde umgeben. Durch die Schwingungen des offenen Oszillators wird also nach allen Seiten des Raumes elektromagnetische Energie ausgestrahlt, die sich in der Gestalt **elektromagnetischer Wellen** fortpflanzt.

Fig. 56.



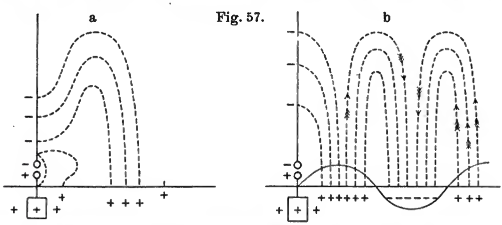
Strahlung des stabförmigen Oszillators. Wie es die Hertzschen Kurventafeln für einen stabförmigen Oszillator von geringen Abmessungen zeigen, so haben wir uns z. B. auch die Abschnürung und Ausbreitung der in Fig. 49 auf S. 58 angedeuteten Kraftlinien zu denken. Jeder gestreckte Erreger strahlt elektromagnetische Wellen aus.

Wenn die eine Oszillatorhälfte durch eine Erdverbindung ersetzt wird, ein Fall von besonderer Wichtigkeit für die praktische Anwendung in der Wellentelegraphie, so werden nach unseren Betrachtungen auf S. 57 die elektrischen Vorgänge in dem verbleibenden Oszillatordraht nicht wesentlich verändert. Es werden ebenso wie vorher elektrische Kraftlinien ausgesendet. Um uns von ihrem Verlauf ein Bild zu machen, stellen wir uns vor, der zweite Oszillatordraht sei ganz in die Erde versenkt. Fig. 56 würde dann für eine Seite das Austreten der Kraftlinien andeuten. Von ihnen werden sich aber nur die vom wirklich vorhandenen Oszillatordraht ausgehenden, über der Erdoberfläche gezeichneten Teile frei ausbilden. Wie die Abschnürung und Ausbreitung vor

sich geht, ist aus Figg. 57 a und b zu erkennen. Fig. 57 a zeigt die Abschnürung, Fig. 57 b eine Reihe bereits abgetrennter Kraftlinienringe [1]). Diese erscheinen hier als halbe Ringe, deren andere Hälften in der Erde verlaufen. Die Enden der Halbringe stehen mit den gleichnamigen elektrischen Polen nebeneinander, so daß sie sich heftig abstoßen und auseinander drängen.

Einfluß der Erde. Welchen Einfluß die Erde auf die Ausbreitung der elektrischen Kraft hat, wird zurzeit noch verschieden beurteilt. Einige erkennen ihn überhaupt nicht an, weil die Erde zur Ausstrahlung der Wellen nicht nötig sei, und in großer Entfernung von einem Oszillator ohne Erdverbindung Wellen nachzuweisen sind. Eine Einwirkung der Erde muß jedoch vorhanden sein, denn die Erfahrung lehrt, daß Wellen, welche von einem der Fig. 57 entsprechend angeordneten Oszillator ausgesandt werden, dann wesentlich größere Entfernungen zu überbrücken vermögen, wenn

Fig. 57.



zwischen der sendenden und empfangenden Stelle das Meer oder gut leitendes feuchtes Erdreich sich befindet.

Mit der durch die Ablösung der Kraftlinienringe versinnlichten Ausstrahlung elektromagnetischer Energie in den freien Raum sind daher auch fortschreitende elektrische Zustandsänderungen auf der Erde verbunden. Sie pflanzen sich mit um so geringeren Verlusten fort, je besser das Erdreich leitet. Diese Ausbreitung der elektrischen Energie längs der Erdoberfläche ist in Fig. 57 b durch die ausgezogene Wellenlinie angedeutet.

Die Wirkung der Erde läßt sich durch folgendes Beispiel erläutern. Durch die von einer tönenden Stimmgabel (Oszillator) ausgehenden Luftwellen wird eine entfernt aufgestellte, auf gleichen Ton abgestimmte Stimmgabel (Resonator) zum Tönen gebracht. Die Übertragung des Tones erfolgt jedoch stärker, wenn z. B. beide Stimmgabeln auf einen Holzbalken, die eine an dem einen, die andere an dem anderen Ende, fest aufgesetzt werden. Noch weit kräftiger wird die Wirkung, wenn der Balken durch einen Resonanzkasten ersetzt wird, der im Rhythmus der Wellen selbst mitschwingt. Eine ähnliche Rolle wie der Holzbalken oder der Resonanzkasten mag bei der Übertragung der elektromagnetischen Schwingungen die Erde spielen.

Neuerdings werden Ansichten laut [2]), welche der Erde den Hauptanteil an der Ausbreitung der Wellen zusprechen. Die Erörterung der Frage über

---

[1]) J. A. Flemming, Elektrische Wellentelegraphie, S. 24. — [2]) Dr. A. Koepsel, E. T. Z. 1906, S. 752.

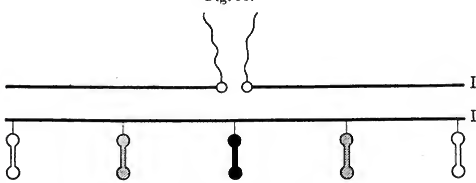
die Bedeutung der Verbindung des Oszillators mit der Erde hat jedoch noch nicht zu einem einwandfreien und unbestrittenen Ergebnis geführt; wir wollen uns daher lediglich an die bei praktischen Versuchen festgestellten Tatsachen halten.

Strahlungsdämpfung. Durch die Abschnürung der Kraftlinienringe wird die Gesamtzahl der zum Leiter zurückkehrenden Kraftlinien vermindert, die Energie der Schwingungen wird also geschwächt, d. h. die Schwingungen werden gedämpft. Im stabförmigen Oszillator tritt demnach zu der Dämpfung durch den Ohmschen Widerstand diejenige durch Strahlung, so daß die Schwingungen noch viel schneller abklingen, als im geschlossenen Schwingungskreise. Aber die Dämpfung der Schwingung durch Strahlung ist nicht nachteilig, sondern sogar vorteilhaft, denn je kräftiger die Strahlung des Oszillators ist, um so mehr Energie kann in die Ferne übertragen werden.

XIII. Die Aufnahme elektromagnetischer Schwingungen im offenen Resonator.

Oszillator und Resonator in Resonanz. Treffen die vom stabförmigen Oszillator ausgesandten elektromagnetischen Wellen einen gleichartigen, d. h. einen offenen, stabförmigen Resonator, so erregen sie in diesem

Fig. 58.



gleichfalls elektrische Schwingungen. Die Wirkung kann bei der Verwendung geeigneter Apparate noch auf sehr große Entfernungen beobachtet werden. Sie ist am kräftigsten, wenn sich Resonator und Oszillator in Resonanz befinden, wenn also die Eigenschwingungen beider Systeme ihrer Periodenzahl und ihrer Wellenlänge nach einander gleich sind. Die Resonanz wirkt hier ebenso, wie bei geschlossenen Schwingungskreisen. Die Übereinstimmung der Wellenlängen ist bei gerade gestreckten Leitern sehr leicht zu erreichen, denn da die Wellenlänge ein Vielfaches der Drahtlänge ist, brauchen Sende- und Empfangsdrähte nur gleich lang gemacht zu werden, um auf gleiche Wellenlänge abgestimmt zu sein.

Wird ein stabförmiger Oszillator I, wie es Fig. 58 zeigt, in der Mitte durch ein Induktorium erregt, so lassen sich die Schwingungen in dem empfangenden System II z. B. durch Geißlersche Röhren, welche an den Resonator angehängt werden, nachweisen. Durch diese Röhren, die mit einem stark verdünnten Gase, Helium, gefüllt sind, hindurch gehen beim Auftreten hoher Spannungen Entladungen in den freien Raum hinaus, so

daß die Röhren aufleuchten. Der Grad ihrer Helligkeit ist ein Maß für die Größe der Spannung, die an den verschiedenen Stellen des Drahtes herrscht. Befinden sich Sender und Empfänger in Resonanz, so zeigt der Versuch, daß die Spannung sich am Resonator ebenso verteilt, wie am Oszillator. Die Röhre in der Mitte bleibt dunkel, die Röhren an den Enden leuchten am hellsten und die Röhren in den Zwischenlagen beginnen Licht auszustrahlen. Wie bei dem Sendedrahte bildet sich also am Empfangsdrahte in der Mitte ein Spannungsknoten und an den beiden Enden je ein Spannungsbauch. Der Resonator ist auf die Wellenlänge des Oszillators abgestimmt.

Verstimmung des Resonators. Wird die Länge des Resonators und mit ihr seine Eigenschwingung dadurch verändert, daß der Draht auf einer Seite verlängert oder verkürzt wird, so erlöschen die Lampen oder sie leuchten sehr schwach und lassen keine Gesetzmäßigkeit mehr erkennen.

Wir sehen, daß sich die Eigenschwingung des Resonators und die ihm aufgezwungene fremde Schwingung in ihrer Wirkung beeinträchtigen, weil sie in ihrer Schwingungsdauer nicht mehr übereinstimmen. Eine Verstimmung wird, wie sich an den Heliumröhren beobachten läßt, auch erreicht, wenn entweder an den Sender oder an den Empfänger eine Kapazität angeschlossen wird, z. B. eine Metallmasse, ein Stück Stanniolpapier od. dgl.

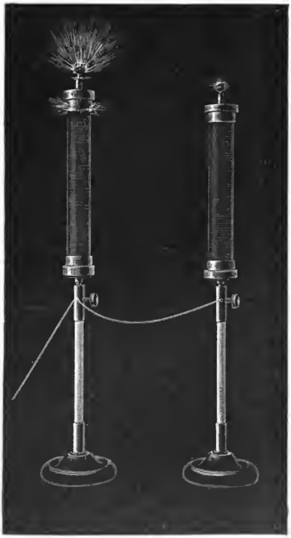
XIV. Schwingungen in Spulen.

Spulen als Schwingungssysteme. Außer dem Kondensatorkreise und dem stabförmigen Oszillator, welche wir als Schwingungssysteme für elektromagnetische Wellen kennen gelernt haben, besitzt ein drittes Schwingungselement Bedeutung für die Wellentelegraphie, nämlich die einfache, eisenlose Spule. Wenn wir einen gestreckten Draht auf einen Glaszylinder so aufwickeln, daß die einzelnen Windungen gegeneinander isoliert sind, so ist die Selbstinduktion des aufgespulten Drahtes größer als diejenige des gestreckten Drahtes von derselben Länge. Infolgedessen werden zwar die Periodenzahl und die Wellenlänge der Eigenschwingung beeinflußt, der Charakter der längs des Drahtes verlaufenden Schwingung wird jedoch nicht geändert. Eine solche Spule kann daher sowohl zur Erzeugung als zum Empfang elektrischer Wellen dienen. Ihre besonderen Eigenschaften sind hohe Selbstinduktion, verhältnismäßig geringe Kapazität, sehr geringe Ausstrahlung elektromagnetischer Energie und geringe Dämpfung. Daß Spulen nur wenig Energie ausstrahlen können, erhellt aus derselben Betrachtung, welche wir auf S. 49 für die Fernwirkung des geschlossenen Schwingungskreises angestellt haben. Auch bei der Spule wirkt die eine Hälfte jeder Windung der anderen Hälfte entgegen. Durch Strahlung werden die Schwingungen einer Spule daher nicht gedämpft. Ferner ist infolge der geringen Kapazität die Stromstärke der Schwingungen entsprechend der Formel [32] nur schwach, so daß die durch Stromwärme verursachten Verluste auch nur klein sind.

Spulen werden in der Technik der Wellentelegraphie vielfach verwendet. In ähnlicher Weise wie Transformatoren in Wechselstromanlagen oder im Fernsprechbetriebe dienen sie z. B. zur Übertragung der Wellen von einem Strom-

kreise auf einen anderen vermöge der gegenseitigen Induktion. Wesentliche Dienste leisten sie bei der Abstimmung eines Oszillators oder eines Resonators auf eine bestimmte Wellenlänge. Um z. B. die Eigenschwingung eines gestreckten Leiters von $2l = 10$ m Länge, welche nach der Formel [54] einer Welle von 20 m gleich ist, auf eine solche von 200 m zu bringen, müßte der Leiter zehnmal so lang gemacht, also um 90 m verlängert werden. Diese Verlängerung ist mit geringer Mühe durch die Anschaltung einer Spule zu erreichen. Der in der Spule aufgewickelte Draht braucht dabei nicht 90 m lang zu sein, denn schon seine erhöhte Selbstinduktion verlangsamt die Schwingungen. Die Spulen erzeugen also ebenso lange Wellen wie gestreckte Leiter, sie drängen aber den Schwingungsvorgang auf einen sehr engen Raum zusammen. Aus diesem Grunde sind sie z. B. besser als lange Drähte zur Demonstration elektromagnetischer Wellen in kleinen Versuchsräumen geeignet. Mit einem für diesen Zweck gebauten Instrumentarium hat Dr. Seibt eine Anzahl von Versuchen angestellt, welche die Wirkung der Resonanz besonders deutlich zeigen und die Vorführung vor einem größeren Hörerkreise sehr erleichtern.

Fig. 59.



Die Resonanzversuche von Dr. Seibt. Zur Erregung der Schwingungen dient ein von einem Induktorium gespeister geschlossener Schwingungskreis. Seine Kapazität und Selbstinduktion sind veränderlich, so daß auch die Frequenz der Schwingungen in weiten Grenzen geändert werden kann. Werden an diesen Kreis Spulen angeschlossen, so geraten auch sie in Schwingungen, und zwar dann am kräftigsten, wenn ihre Eigenperiode gleich derjenigen der ihnen zugeführten Schwingungen ist. In diesem Falle der Resonanz wird die Spannung in der Spule so stark, daß Funken von mehreren Centimetern Länge in kräftigen Büschelentladungen aus der Spule hervortreten. Fig. 59 zeigt zwei gleichzeitig an dem Erregerkreise angeschlossene Spulen, von denen sich die eine mit den Schwingungen des Kondensatorkreises in Resonanz befindet[1]). Wird in diesem Kreise die Selbstinduktion nur wenig geändert, so erlischt die Funkenentladung. Durch

[1]) Die Fig. 59 ist dem Werke von H. Starke, „Experimentelle Elektrizitätslehre", Leipzig 1904, entnommen; sie findet sich dort als Fig. 248 auf S. 348.

weitere Veränderung der Selbstinduktion kann die Frequenz so reguliert werden, daß sie mit der Eigenschwingung der zweiten Spule übereinstimmt. Jetzt strahlt diese leuchtende Funken aus, während die erste dunkel bleibt. Sehr schön läßt sich zeigen, wie die Annäherung von Körpern die Kapazität dieser Spulen beeinflußt, und wie im Zusammenhange damit die Eigenschwingungen verändert werden. Schon durch Annähern der Hände wird eine Spule so verstimmt, daß die Funken erlöschen. Die gleiche Erscheinung tritt ein, wenn z. B. ein Stück Stanniol auf die Spule gelegt wird.

Fig. 60.



Besonders gut läßt sich der Verlauf der Wellen an dem in Fig. 60 dargestellten Apparate sichtbar machen.

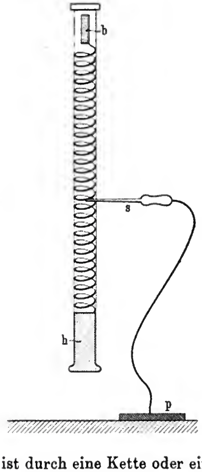
Parallel zu der aufrecht stehenden, etwa 2 m langen Spule ist in geringem Abstande ein unten geerdeter Draht ausgespannt, der gegen die Spule gut isoliert ist. Der untere Anfang des Spulendrahtes ist mit dem durch den Buchstaben *P* angedeuteten Erregersystem verbunden. Dieser Spule kommt infolge ihrer Kapazität und Selbstinduktion eine ganz bestimmte Wellenlänge als Grundschwingung zu, welche von dem Vierfachen der gesamten Länge des aufgespulten Drahtes nicht sehr verschieden ist. Schwingt die Spule in dieser Grundschwingung, so befindet sich an ihrem oberen Ende ein Spannungsbauch, an ihrem unteren Ende ein Spannungsknoten. Der herrschenden Spannung entsprechend gehen von den Windungen der Spule nach dem geerdeten Drahte Büschelentladungen über, die im oberen Teile hell leuchten und nach unten hin immer schwächer werden; ganz unten, an der Stelle des Spannungsknotens, bleibt der Zwischenraum dunkel. Der vierte Teil der Grundwelle ist auf diese Weise sichtbar geworden. Ihre Länge erscheint allerdings gegen die wirkliche Länge verkürzt, weil eben der Draht aufgespult ist. Wird nun die Frequenz des Erregerkreises verändert, so wird die Abstimmung auf Resonanz gestört, die Lichtwirkung verschwindet. Durch passende Regulierung von Selbstinduktion und Kapazität des Erregerkreises gelingt es jedoch, die Periodenzahl desselben mit derjenigen der Oberschwingungen der Spule in Übereinstimmung zu bringen. In solchen Fällen erzeugt die Resonanz ebenfalls kräftige Schwingungen, deren Spannungsbäuche und -knoten an den hellen und dunkeln Stellen der Büschelentladungen zu erkennen sind. Auf solche Weise kann man die Spule in $^1/_4$, $^3/_4$, $^5/_4$ Wellen schwingen lassen. Den letzteren Fall mit drei Wellenbäuchen und drei Knotenpunkten zeigt eben Fig. 60.

Diese Versuche enthalten die Grundlage für die sogenannten Meßspulen oder Meßstäbe, welche im folgenden Abschnitt behandelt werden.

XV. Wellenmesser.

Allgemeines. Zu einem Wellenmesser gehört ein Schwingungssystem, dessen Eigenschwingungen in bekannten Abstufungen verändert werden können, sowie ein Strom- oder ein Spannungszeiger, der auf die schnell schwingenden Wechselströme anspricht. Wird der Wellenmesser durch die zu untersuchenden Wellen eines anderen Systems erregt, so entstehen in ihm Schwingungen. Seine Kapazität oder seine Selbstinduktion oder beide werden so lange verändert, bis die Spannung und die Stromstärke seiner Schwingungen Höchstwerte haben. Damit ist erreicht, daß der Wellenmesser sich mit dem anderen System in Resonanz befindet, d. h. daß die Frequenz der Schwingungen in beiden die gleiche ist. Für jede Einstellung der Kapazität und der Selbstinduktion des Wellenmessers ist die zugehörige Wellenlänge bestimmt, so daß sie für den praktischen Gebrauch auf einer Skala vermerkt und sofort abgelesen werden kann. Wäre für die im vorigen Abschnitt beschriebenen Versuche eine größere Anzahl von Spulen mit verschiedenen bekannten Eigenperioden vorhanden, oder ließe sich die Eigenperiode einer Spule in bekannten Grenzen abstufen, so könnte die Wellenlänge eines Erregerkreises dadurch bestimmt werden, daß ermittelt wird, welche der unveränderlichen Spulen oder in welcher Einstellung die regulierbare Spule mit jenem Erregerkreise auf Resonanz abgestimmt ist. Solche Spulen sind in Verbindung mit verstellbaren Funkenstrecken zur Abstimmung von Schwingungssystemen benutzt worden (Abstimmspulen).

Fig. 61.

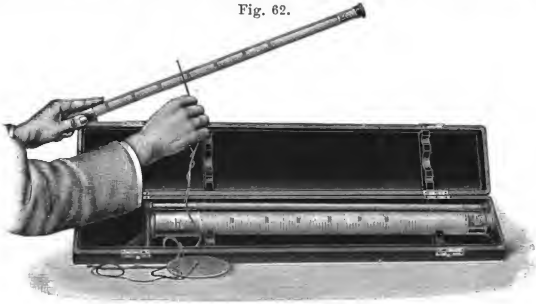


Die Meßstäbe von Slaby. Professor Slaby[1]) hat Apparate der angegebenen Art zu handlichen Meßgeräten ausgebildet. Die Slabyschen Meßstäbe werden, wie es in Fig. 61 schematisch angedeutet ist, in der Weise hergestellt, daß sehr dünne isolierte Drähte in vielen Windungen über eine Glasröhre gewickelt und auf der einen Seite an eine metallene Handhabe *h* geführt werden. Ein metallener Kontaktstift *s* ist durch eine Kette oder eine leitende Schnur mit einer kleinen Metallplatte *p* verbunden, welche, auf einen Tisch oder auf den Fußboden des Arbeitszimmers gelegt, eine Verbindung mit der Erde herstellt. Berührt man die als Meßstab bezeichnete Spule mit dem Stift, so nehmen die ankommenden Wellenströme ihren Weg durch den oberen Teil der Windungen, den Kontaktstift *s* und die Platte *p* zur Erde. Das untere Stück der Spule zwischen der Hand-

[1]) Slaby, E. T. Z. 1903, S. 1007.

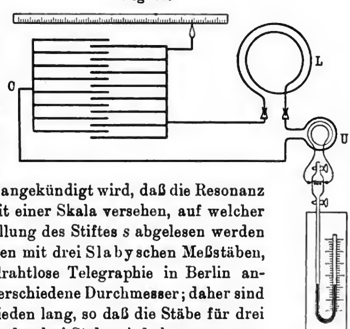
habe *h* und dem Stift *s* wird durch den Körper des Beobachters, welcher Handhabe und Stift in seiner Hand hält, überbrückt. Die Metallplatte *p* kann entbehrt werden, wenn der Körper des Beobachters selbst ausreichend zur

Fig. 62.



Erde ableitet. Auch kann der Metallstift durch den Finger ersetzt werden. Durch Verschieben des Stiftes oder des Fingers auf dem Meßstabe wird der an der Schwingung beteiligte Teil der Selbstinduktion, also auch die Eigenschwingung des ganzen Systems, verändert. Mit der Eigenschwingung des Stabes wird aber auch die von der zu messenden Welle induzierte Spannung beeinflußt. Um dies sichtbar zu machen, ist am oberen Ende der Spule bei *b* ein Blättchen von Baryumplatincyanür-Papier angebracht, welches die Eigenschaft hat, unter der Einwirkung elektrischer Spannungen aufzuleuchten. Je höher die Spannung ist, um so heller leuchtet das Blättchen. Durch Hin- und Herfahren mit dem Stift *s* läßt sich das Maximum des Aufleuchtens finden, durch welches angekündigt wird, daß die Resonanz eingetreten ist. Der Stab ist mit einer Skala versehen, auf welcher die Wellenlänge für jede Einstellung des Stiftes *s* abgelesen werden kann. Fig. 62 zeigt einen Kasten mit drei Slabyschen Meßstäben, wie ihn die Gesellschaft für drahtlose Telegraphie in Berlin anfertigen läßt. Die Stäbe haben verschiedene Durchmesser; daher sind die aufgespulten Drähte verschieden lang, so daß die Stäbe für drei Meßbereiche passen. Mit einem der drei Stäbe wird eben gemessen.

Fig. 63.

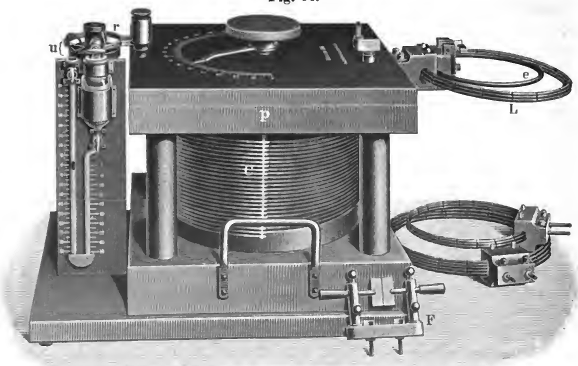


Der Wellenmesser von Dönitz[1]. Nach dem Prinzip des Resonanzversuches von Lodge (S. 45) hat Dönitz einen Wellenmesser hergestellt, dessen Schaltungsschema in Fig. 63 wiedergegeben ist.

[1]) Dönitz, E. T. Z. 1903, S. 920.

Die Kapazität eines Plattenkondensators *C* läßt sich dadurch kontinuierlich verändern, daß die Hälfte der Platten durch Drehen an einem Knopf in ihrer Lage zu der anderen Hälfte verschoben wird. Dieser Kondensator ist mit der Selbstinduktionsspule *L* zu einem Stromkreise vereinigt. Wird die Spule *L* in die Nähe eines von elektromagnetischen Schwingungen durchflossenen Drahtes gebracht, so daß die jenen Draht umschließenden magnetischen Kraftlinien auch die Spule *L* treffen, so werden in dem Kreise des Wellenmessers Schwingungen erregt. Um die Stromstärke dieser Schwingungen zu messen, wird ein Rießsches Luftthermometer (S. 9) benutzt, welches durch den Transformator *U* induktiv mit dem Schwingungskreise verbunden ist. Wird die Stellung der Kondensatorplatten gegeneinander verschoben, so erkennt man die hiermit verbundene Änderung der Eigenschwingungen des Wellenmessers an der Bewegung der Flüssigkeitssäule in

Fig. 64.

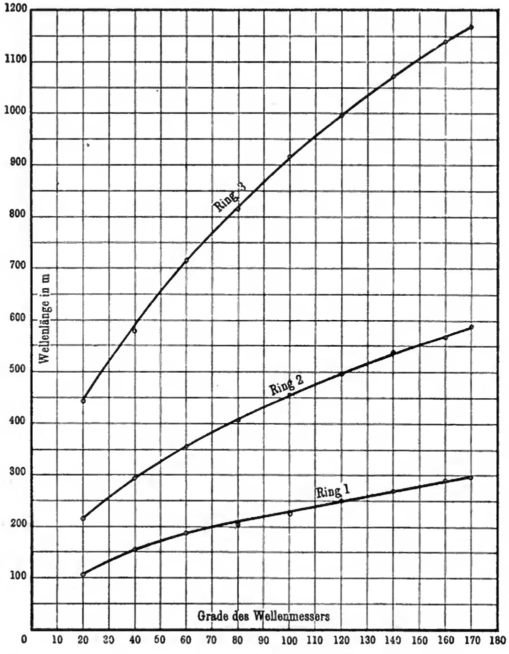


dem Luftthermometer. Je näher die beiden schwingenden Systeme sich in ihrer Eigenschwingungszahl kommen, um so kräftiger wird der Strom, den das Thermometer anzeigt. Der höchste Stand der Flüssigkeitssäule kennzeichnet diejenige Einstellung des Kondensators, bei welcher sich die beiden Systeme in Resonanz befinden.

Fig. 64 zeigt den Dönitzschen Wellenmesser in der von der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie ausgeführten Form. Die 48 Platten des veränderlichen Kondensators sind halbkreisförmig aus Messing hergestellt und haben einen Radius von etwa 100 mm und eine Dicke von 1 mm. Gleichmäßig in Abständen von 2 bis 3 mm sind 24 dieser Platten senkrecht übereinander angebracht und an metallenen Bolzen befestigt. Die anderen 24 Platten sind in derselben Anordnung an einem metallenen, durch die Mitte gehenden Stabe befestigt, der oben den Knopf trägt, an welchem der Stab gedreht wird. Bei einer Drehung des Stabes schieben sich die beweglichen Platten zwischen die feststehenden. Der auf solche Weise regulierbar zu-

sammengesetzte Kondensator ist zur Erhöhung seiner Kapazität in ein mit geeignetem Öl gefülltes Glasgefäß gesetzt, das oben durch eine Hartgummiplatte p verschlossen wird. Auf der oberen Fläche der Platte ist eine Gradeinteilung angebracht, über welche der mit dem beweglichen Stabe verbundene Zeiger streicht, um die Stellung der Kondensatorplatten zueinander anzugeben. Die Drahtverbindungen führen von beiden Plattenhälften über einen kupfernen

Fig. 65.



Ring r zu einer Ansteckdose, mit welcher die Selbstinduktionsspule L in den Kreis eingeschaltet wird. Der Kupferring r dient als primäre Wickelung des Transformators u, welcher die Wirkung der Wellenströme auf das Luftthermometer überträgt. Die sekundäre Spule ist innerhalb dieses Ringes verschiebbar angeordnet, so daß die übertragende Wirkung verstärkt oder vermindert werden kann.

Um die Wellenlänge eines Schwingungskreises zu messen, wird der Apparat diesem Kreise genähert und, wenn möglich, so aufgestellt, daß die

Drähte der Selbstinduktionsspule zu einem oder mehreren Drähten des zu messenden Kreises parallel liegen. Ist dies nicht ausführbar, so benutzt man eine „Erregerschleife“. Es ist das ein einfacher, an einer Stelle offener Ring *e*, der zur Selbstinduktionsspule *L* konzentrisch liegt und von ihr isoliert bleibt.

Die Erregerschleife wird in das System eingeschaltet, dessen Wellen gemessen werden sollen. Diese Wellen erregen das Schwingungssystem des Wellenmessers durch Induktion. Man verändert die Kapazität durch Drehen am Knopfe der beweglichen Kondensatorhälfte so lange, bis die Flüssigkeitssäule im Thermometer einen Stand erreicht, der beim Weiterdrehen wieder abnehmen würde. Gelingt es durch Verschieben der Kondensatorplatten allein nicht, den Höchststand der Flüssigkeit zu ermitteln, so ist die Selbstinduktionsspule auszuwechseln und zwar gegen eine größere, wenn die Flüssigkeitssäule bei der Vermehrung, durch eine kleinere, wenn sie bei der Verminderung der Kapazität andauernd gestiegen war. Zu diesem Zwecke sind dem Apparat drei Selbstinduktionsspulen, jede mit einer dazu passenden Erregerschleife, beigegeben. Welche Wellenlänge der an der Skala abzulesenden Kondensatoreinstellung für jede der drei Spulen entspricht, kann mit Hilfe einer dem Wellenmesser beigefügten, in Fig. 65 wiedergegebenen Kurventafel ermittelt werden. Ist z. B. bei der Verwendung des Selbstinduktionsringes Nr. 2 eine Kondensatorstellung von 90° abgelesen worden, so entspricht das nach der mittelsten Kurve einer Welle von etwa 430 m Länge. Diese Kurven gelten natürlich nur für den einen bestimmten Apparat, an welchem sie durch Eichung festgestellt sind.

Der Wellenmesser gestattet, Wellenlängen zwischen 100 und 1200 m zu messen. Statt des Luftthermometers kann als Spannungsmesser auch die verstellbare Funkenstrecke *F* eingeschaltet werden, welche in Fig. 64 sichtbar ist.

Der Wellenmesser von Dr. G. Seibt. Die Aktiengesellschaft C. Lorenz[1]) in Berlin hat nach den Angaben von Dr. G. Seibt einen Wellenmesser gebaut, von welchem Fig. 66 die Gesamtansicht zeigt. Der Seibtsche Wellenmesser enthält ebenso wie der vorher beschriebene einen geschlossenen Schwingungskreis, der hier aus einem Kondensator mit vier Unterabteilungen und einer stetig veränderlichen Selbstinduktion gebildet ist. Die Energie der in diesem Resonanzkreise erregten Schwingungen wird durch ein Thermoelement in Verbindung mit einem Millivoltmeter gemessen.

In der Stromlaufzeichnung (Fig. 67, S. 72) bedeuten *A* und *B* die Spulen der veränderlichen Selbstinduktion, *C* den Stufenkondensator mit vier Unterabteilungen, welcher durch den Schalter *D* mit der Spule *A* verbunden ist. *K* ist das Thermoelement, *E* eine Erregerschleife, die nach Bedarf horizontal oder vertikal in die Buchse *F* eingesteckt werden kann. *G* ist ein sogenannter Kurzschlußstöpsel, welcher die nach *B* und *C* führenden Drähte untereinander verbindet. Werden *E* und *G* in die für sie bestimmten Stöpsellöcher eingesetzt, so wird der Schwingungskreis *A*—*F*—*E*—*F*—*K*—*B*—*G*—*C*—*D*—*A* geschlossen. Der Stöpsel *G* drückt gleichzeitig gegen die

---

[1]) C. Lorenz, A.-G., Beschreibung usw. des Wellenmessers nach Dr. G. Seibt, Sonderausgabe, Nr. 102.

Kontakte H, schließt diese und verbindet so das Millivoltmeter J mit dem Thermoelement K.

Die Erregerschleife dient zur Übertragung der zu messenden Wellen auf den Wellenmesser. Sie besteht aus zwei ineinander gelegten, jedoch voneinander isolierten Drahtringen, welche wie die primäre und sekundäre Wickelung eines Transformators durch gegenseitige Induktion aufeinander wirken. Der äußere, in Fig. 67 gezeichnete Drahtring E wird bei F in den Schwingungskreis des Wellenmessers, der innere in das zu messende System, z. B. in einen Luftleiter, eingeschaltet. Mit Hilfe einer Stöpselschnur läßt sich statt der Erregerschleife auch ein einfacher, mit Handhabe versehener Drahtring bei F anschließen. Dieser gestattet, in der Nachbarschaft des Wellenmessers Schwingungen an verschiedenen Stellen aufzufangen, ohne daß es nötig wird, das ganze Meßgerät von seinem Standorte zu verrücken.

Fig. 66.

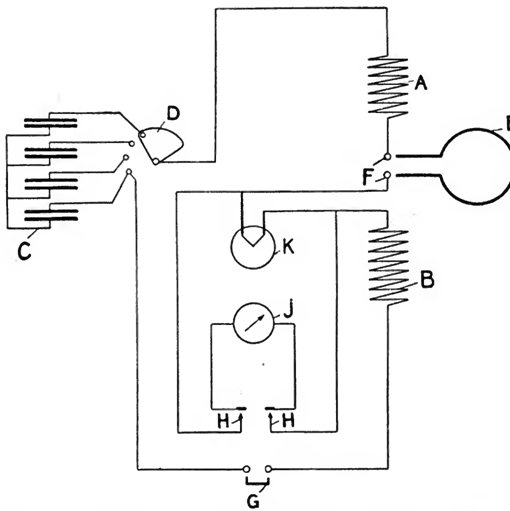


Die veränderliche Selbstinduktion besteht aus zwei ineinander verdrehbaren Spulen, die auf Kugelschalen gewickelt und so dicht, als es aus Isolationsrücksichten angängig ist, einander genähert sind. Die innere Spule ist an einer drehbaren Achse befestigt, welche einen, die Skala des Wellenmessers bestreichenden Zeiger trägt. Je nach der gegenseitigen Lage der Spulen werden Selbstinduktionsbeträge von verschiedener Größe in den Schwingungskreis eingeschaltet, so daß es in Verbindung mit dem stufenweise anschaltbaren Kondensator möglich ist, einen Meßbereich von ungefähr 90 bis 2500 m Wellenlänge zu beherrschen.

Die wesentlichen Teile des Wellenmessers sind in ein kräftiges zylindrisches Gefäß eingebaut (vgl. Fig. 66). Darin sind unten die vier Kondensatoren, darüber die Selbstinduktionsspulen untergebracht, deren durchgehende Achse durch den aus Hartgummi hergestellten Deckel ragt und hier in einem Knopf mit dem Zeiger endigt. Unter einem Ausschnitt des Deckels ist das Millivoltmeter so befestigt, daß seine Skala leicht beobachtet werden kann. Fig. 66 zeigt ferner links das durch ein Lampengewinde angeschlossene Thermoelement, rechts den Schalter zur Veränderung der Kapazität.

Soll die Wellenlänge eines aus einem Kondensator, einer Selbstinduktion und einer Funkenstrecke bestehenden Kreises gemessen werden, so wird der Wellenmesser, nachdem die Erregerschleife eingesetzt und das Thermoelement mittels des Kurzschlußstöpsels eingeschaltet worden ist, dem zu untersuchenden Schwingungskreise genähert. Hierauf wird die Eigenschwingung des Wellenmessers so lange geändert, bis das Millivoltmeter einen merklichen Ausschlag zeigt. Die Einstellung auf Resonanz erfolgt dann, indem man das Steigen oder das Fallen des Ausschlages mit der Veränderung der Wellenlänge beobachtet und empirisch den größten Ausschlag ermittelt. Die

Fig. 67.



Stellung I des Kondensators (kleinste Kapazität) entspricht dem Meßbereich für die kürzesten Wellenlängen, die Stellung IV (größte Kapazität) dem Meßbereich für die längsten Wellen; die Stellungen II und III entsprechen dem Meßbereich für die dazwischenliegenden Wellenlängen. Aus der bekannten Größe der Kapazität und der durch die Einstellung der Spulen, welche an der Skala abgelesen wird, bestimmten Selbstinduktion ergibt sich nach einer dem Instrument beigegebenen Kurve oder Tabelle die gesuchte Wellenlänge.

Der Seibtsche Wellenmesser als Erreger von Schwingungen. Der Seibtsche Wellenmesser kann auch als Oszillator zur Erzeugung von Schwingungen mit genau bekannter Wellenlänge benutzt werden. Für diesen Zweck wird der Kurzschlußstöpsel entfernt und durch eine mit einem kleinen

Induktorium verbundene Funkenstrecke ersetzt. Die Kontakte *H* (Fig. 67) werden beim Herausnehmen des Kurzschlußstöpsels geöffnet, beim Einsetzen der Funkenstrecke aber nicht wieder geschlossen; das Millivoltmeter bleibt daher von dem Schwingungskreise abgeschaltet und somit vor Beschädigungen geschützt. Auch das Thermoelement, das durch starke Ströme beschädigt werden würde, muß entfernt und durch einen in das Gewinde passenden Kurzschlußstöpsel ersetzt werden. Der als Oszillator geschaltete Wellenmesser erzeugt Schwingungen, deren Wellenlänge mit Hilfe der erwähnten Kurve oder Tabelle durch die Einstellung der Kapazität und der Selbstinduktion nach Belieben gewählt werden kann. Hierdurch wird es möglich, die Eigenschwingungszahl von Resonatoren zu bestimmen, also solcher Systeme, die nicht selbst Wellen erzeugen und aussenden. Der zu messende Resonator muß für diesen Zweck jedoch mit einem Wellenanzeiger, z. B. einer Heliumröhre, ausgerüstet werden, damit das Eintreten der Resonanz zu erkennen ist. Um z. B. die Eigenwelle eines Empfangssystems für drahtlose Telegraphie zu ermitteln, stellt man zwischen ihm und dem Wellenmesser mit Hilfe einer in sich geschlossenen Schleifleitung eine Verbindung (Koppe-

Fig. 68.



lung) her, welche die Wellen durch Induktion überträgt. Die von dem Wellenmesser ausgesandten Schwingungen lassen sich dann leicht so regulieren, daß ihre Periodenzahl gleich der Eigenperiode des Empfangskreises ist. Das Eintreten dieses Falles geben die Empfangsapparate zu erkennen, denn sie sprechen dann am sichersten an, wenn Resonanz zwischen Sender und Empfänger herrscht. Je schwächer man die Einwirkung der ausgesandten Wellen macht, um so genauer muß ihre Länge auf die Eigenwelle des Empfangskreises abgestimmt sein, um so sicherer wird daher die Messung.

Um eine Beschädigung des Wellenmessers, während er als geeichter Oszillator arbeitet, zu vermeiden, sind die Kondensatoren im Innern mit Funkenstrecken versehen, die so eingestellt sind, daß sich die Spannungen an ihnen ausgleichen, bevor das Dielektrikum der Kondensatoren in die Gefahr kommt, durchschlagen zu werden.

Fig. 68 zeigt noch einige Zubehörteile des Wellenmessers. Rechts ist die Erregerschleife, daneben der statt ihrer einzuschaltende Drahtring mit Handgriff und Anschlußschnur abgebildet. Der Kurzschlußstöpsel, das Thermoelement und der als Ersatz dafür dienende Kurzschlußstöpsel sowie die Funkenstrecke sind leicht zu erkennen. In der Mitte liegt ein Stöpsel, welcher einen Widerstand von 0,4 Ohm enthält. Dieser kann statt des Kurzschlußstöpsels

bei G (Fig. 67) eingesetzt werden, so daß der Gesamtwiderstand und somit die Dämpfung des Schwingungskreises um einen bekannten Wert vermehrt wird. Diese Änderung der Dämpfung des bekannten Schwingungskreises wird benutzt, um die Dämpfung eines zweiten Systems zu messen [1]).

Die Eichung der Wellenmesser erfolgt in der Weise, daß der Wellenmesser mit einem System, dessen Wellenlänge in anderer Weise genau bestimmt ist, in Resonanz gebracht wird. Ein solches System wird zusammengesetzt aus einem sorgfältig erbauten Kondensator mit vielen Unterabteilungen, dessen Abstufungen genau bekannt sind, und einem nach Maß angefertigten Drahtrechteck, dessen Selbstinduktion durch Verschieben der einen Seite verändert und leicht bestimmt werden kann. Aus den Größen C und L wird die Eigenschwingungszahl dieses Vergleichssystems mit Hilfe der Formel [42] oder [50] berechnet.

Ein anderes, aber weniger empfehlenswertes Verfahren, den Wellenmesser zu eichen, gründet sich auf die Gleichung [52]. Man versetzt gestreckte Oszillatoren, deren Länge mit dem Meterstabe genau gemessen wird, in Schwingungen und bringt den Wellenmesser damit in Resonanz. Die Wellenlänge des Vergleichsoszillators wird bei diesem Verfahren nach Gleichung [54] mit dem Meterstabe ermittelt. Wie wir aber früher gesehen haben, ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Elektrizität in einem frei gespannten Drahte und daher die Wellenlänge, in der dieser Draht schwingt, von äußeren Einflüssen nicht unabhängig. Aus diesem Grunde ist das Meßergebnis nicht zuverlässig genug.

---

[1]) Bei gleichmäßig gedämpften Schwingungen, z. B. den Pendelschwingungen, ist das Dämpfungsverhältnis, d. i. das Verhältnis der Amplitude einer Schwingung zu derjenigen der folgenden konstant; es werde mit k bezeichnet. Der Logarithmus von k ($\log k$) wird das logarithmische Dekrement genannt und mit γ bezeichnet. Für gedämpfte elektrische Schwingungen ist, wenn s_1, s_2, s_3 usw. die Amplituden der aufeinander folgenden Schwingungen bedeuten, ebenfalls $s_1/s_2 = s_2/s_3 = s_3/s_4$ usw. $= k$.

Um die Dämpfung eines Schwingungssystems zu bestimmen, nehme man eine Resonanzkurve auf mit der Wellenlänge λ des Wellenmessers als Abszisse und dem Ausschlage des Millivoltmeters a als Ordinate, dann ist die Summe der beiden Dekremente

$$\gamma_1 + \gamma_2 = 2\pi \, \frac{\lambda - \lambda_r}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{a_r - a}},$$

worin λ_r und a_r die betreffenden Werte für die Resonanz zwischen den beiden schwingenden Systemen bedeuten.

Man führe die Rechnung für mehrere rechts und links von der Resonanzlage zu wählende Punkte der Resonanzkurve durch und nehme das Mittel. Das Verfahren liefert nur, wenn $\frac{\lambda - \lambda_r}{\lambda}$ klein gegen 1 und $\gamma_1 + \gamma_2$ klein gegen 2π ist, richtige Werte.

Um die Dekremente der einzelnen Kreise zu erhalten, erniedrige man durch Einschaltung des erwähnten Stöpselwiderstandes in den Meßkreis den Ausschlag auf den Betrag a_r^1. Die Vermehrung des Dekrements des Sekundärkreises sei γ_2^1, dann ist:

$$\gamma_2 = \gamma_2^1 \, \frac{a_r^1 \left(1 + \frac{\gamma_2^1}{\gamma_1 + \gamma_2}\right)}{a_r - a_r^1 \left(1 + \frac{\gamma_2^1}{\gamma_1 + \gamma_2}\right)}.$$

Von solchen Störungen frei sind jedoch die Lecherschen Doppeldrähte. Diese leisten daher zur Eichung von Wellenmessern gute Dienste.

Die Anordnung der Lecherschen Drähte ist in Fig. 69 gezeigt. An eine Funkenstrecke F sind durch kurze Drähte zwei Metallplatten A und A' angeschlossen. Parallel zu diesen Platten sind zwei gleichartige Platten B und B' angeordnet, welche mit den Drähten $S—T$ und $S'—T'$ in Verbindung stehen. Die Plattenpaare AB und $A'B'$ bilden zwei Kondensatoren. Durch eine auf die Drähte ST gelegte Drahtbrücke — einen mit isolierender Handhabe versehenen Bügel — werden die Kondensatoren zu einem geschlossenen Schwingungskreise $F—A—B—S—X—X'—S'—B'—A'$ zusammengeschaltet. Wird die Funkenstrecke an ein Induktorium angeschlossen, so gerät dieser Kreis in Schwingungen, welche sich auf die Drähte $X—t$ und $X'—t'$ übertragen. Daß auch in diesen Drähten elektromagnetische Schwingungen entstehen, läßt sich nachweisen, wenn man die Enden der Drähte mit den Elektroden einer Heliumröhre gg' verbindet. Diese leuchtet unter dem Einfluß der zwischen den beiden Drähten auftretenden Spannungen auf und zwar dann am hellsten, wenn sich die Drähte $X—t$ und $X'—t'$ mit dem geschlossenen Schwingungskreise in Resonanz befinden. Dieser Zustand kann durch Verschieben der Drahtbrücke $X—X'$ herbeigeführt werden. Die Lecherschen Drähte sind eine der ältesten Anordnungen zur Demonstration elektrischer Wellen. Ist die Resonanzlage für die Brücke $X—X'$ gefunden, so läßt sich die Verteilung der Spannung längs der Drähte in ähnlicher Weise, wie wir es beim offenen Resonator bereits kennengelernt haben, mit Hilfe einer Heliumröhre nachweisen. An den Enden t und t' leuchtet die Röhre am hellsten; verschiebt man sie nach der Brücke $X—X'$ zu, so wird das Leuchten immer schwächer; in der Stellung $X—X'$ erlischt es. An dieser Stelle befindet sich also ein Spannungsknoten, an den freien Enden ein Spannungsbauch. Die Drähte enthalten daher den vierten Teil einer ganzen Welle. Die Länge dieser Welle, der Grundschwingung der Drähte, ist mithin viermal so lang, wie die Entfernung von X bis t. Wird die Brücke $X—X'$ in der Richtung nach SS' hin weiter verschoben, so wird die Selbstinduktion des geschlossenen Kreises $ABSX$ vermindert, seine Wellenlänge also verkürzt. Resonanz tritt dann wieder auf, wenn in den Drähten Xt eine Oberschwingung entsteht. An dem freien Ende wird die Heliumröhre stets einen Spannungsbauch nachweisen. Auf dem Wege von t nach X

Fig. 69.

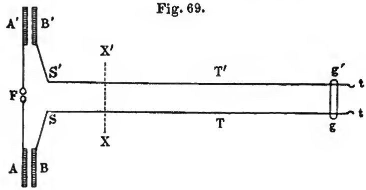
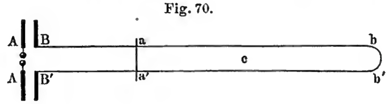


Fig. 70.



wird sie nach richtiger Einstellung der Brücke einen Spannungsknoten, einen zweiten Spannungsbauch und schließlich bei $X—X'$ wieder einen Spannungsknoten anzeigen.

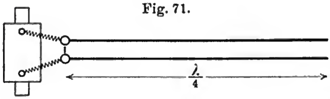
Verbindet man die freien Leiterenden durch einen Draht, wie in Fig. 70, so gleicht dieser alle Spannungsunterschiede sofort aus. An den Drahtenden muß in diesem Falle immer ein Spannungsknoten auftreten. Durch geeignete Stellung der Brücke $a—a'$ läßt sich der Verlauf der Welle so regulieren, daß sich an der Brücke bei a und an den Enden der Drähte bei b je ein Spannungsknoten und dazwischen ein Spannungsbauch befindet. Bei a und b ist die Röhre also dunkel, in der Mitte leuchtet sie am hellsten. Auch in dieser Schaltung sind Oberschwingungen durch passende Verschiebung der Brücke zu erzielen.

Diejenigen Stellen, an welchen sich Spannungsknotenpunkte befinden, können nun nach Lechers Untersuchungen durch einen Draht miteinander verbunden werden, ohne daß in dem Schwingungszustande des Systems etwas geändert wird; im Gegenteil gestattet dieses Hilfsmittel eine schärfere Abgrenzung der Resonanzlage für die Brücke und eine genaue Festlegung der Knotenpunkte, so daß ihr Abstand mit einem Meterstabe gemessen und somit die Länge der Welle genau bestimmt werden kann. Nach Hertz ist die Anordnung der Fig. 70 die für reine Versuche geeignetste[1]). Bedingung dafür, daß sich die Wellen über das ganze System der Lecherschen Drähte hin gleichmäßig verteilen, ist, daß die Drähte überall in gleichem Abstande verlaufen, denn nur dann ist die Kapazität, welche den Wellenverlauf wesentlich beeinflußt, überall gleich. Werden die beiden Drähte in geringer Entfernung voneinander gehalten (5 bis 15 cm), so halten sich die elektrischen Kraftlinien in der Hauptsache zwischen den beiden geladenen Leitern gegenseitig fest. Daher wird der Verlauf der Wellen durch äußere Einflüsse, wie durch die Annäherung von Massen, z. B. des Körpers des Beobachters, fast gar nicht, wenigstens bei weitem nicht in dem Maße gestört, wie dies bei einzelnen Drähten der Fall ist.

Unter Zugrundelegung der Lecherschen Versuche sind u. a. von P. Drude[2]) und ferner in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt[3]) Eichungen von Wellenmessern vorgenommen worden.

Slaby hat die Meßschaltung nach Fig. 71 vereinfacht, indem er die beiden Paralleldrähte unmittelbar mit den Polen des Induktoriums verband. Die Länge der Wellen wird bei dieser Anordnung durch die Länge der Drähte bestimmt. Für die Grundschwingung ist sie gleich dem Vierfachen der Drahtlänge.

Fig. 71.



Da die Lecherschen Drähte in einer viertel oder halben Welle schwingen, lassen sich Wellen bis zu 400 m ohne besondere Mühe mit ihnen messen. Die zu eichenden Wellenmesser werden mit den schwingenden Drahtsystemen in Resonanz gebracht.

---

[1]) Hertz, Ges. Abhandlungen, S. 200. — [2]) P. Drude, E. T. Z. 1905, S. 200. — [3]) E. Gehrcke, E. T. Z. 1905, S. 697.

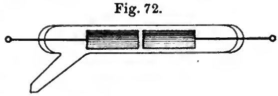
XVI. Wellenanzeiger.

Einige Hilfsmittel, die in einem Resonator entstehenden Schwingungen nachzuweisen, sind uns bereits begegnet; so der Ausgleich der im Resonator erregten Spannungen durch einen Funken und das Aufleuchten der Geißlerschen Röhren. Ebenso spricht eine Reihe der früher beschriebenen Wechselstrom-Meßgeräte auf die schnellen Schwingungen an, z. B. die Hitzdrahtinstrumente und das Rießsche Luftthermometer. Instrumente dieser Art sind für viele Laboratoriumsversuche ausreichend empfindlich; sie versagen aber, wenn man elektrische Wellen in großer Entfernung von dem Erreger nachweisen will. Für diese Zwecke bedarf es sehr viel empfindlicherer Apparate, denn die Energie der ankommenden Wellen ist nur gering, weil sie mit dem Quadrate der Entfernungen abnimmt. Wie wir auf S. 10 besprochen haben, ist die Energie oder elektrische Arbeit dem Quadrate der Stromstärke proportional; die Stromstärke der elektromagnetischen Schwingungen nimmt daher in geradem Verhältnis mit der Entfernung ab.

Die wichtigsten bisher konstruierten Wellenanzeiger, auch Wellendetektoren oder Wellenindikatoren benannt, sind die folgenden: Der Fritter oder Kohärer, die Mikrophonkontakte, der elektrolytische Wellendetektor, das Hitzdrahtinstrument von Fessenden, das Thermoelement von Klemencic und der magnetische Detektor von Marconi.

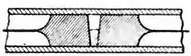
Der Fritter oder Kohärer. Zwischen zwei in eine Glasröhre eingeschmolzenen Metallkolben (Fig. 72) befinden sich Metallkörner, Metallpulver oder Metallfeilicht. An die Zuführungsdrähte zu den Kolben ist ein Element und ein Galvanometer oder ein Relais angeschlossen. Im gewöhnlichen Zustande besitzen die Metallkörner gegenüber der Spannung des Elementes einen sehr hohen Widerstand. Das Galvanometer zeigt daher keinen Strom an. Wird aber das Metallpulver von einer elektromagnetischen Schwingung getroffen, so wird es leitend, es entsteht ein Strom und das Galvanometer zeigt einen dauernden Ausschlag, oder das Relais spricht an. Erschüttert man den Inhalt der Röhre durch Klopfen, so erlangt das Metallpulver wieder seinen ursprünglichen hohen Widerstand und der Strom verschwindet. Über die Wirkungsweise dieser Einrichtung sind eine Anzahl von Theorien aufgestellt worden, ohne daß es bis jetzt gelungen wäre, eine Erklärung zu finden, die allen beobachteten Erscheinungen gerecht wird. Die verbreitetste und wahrscheinlich richtigste Auffassung ist die folgende: Die Körner sind von einer sehr dünnen, nichtleitenden Oxydschicht umhüllt, die schon bei ganz kurzer Berührung mit der Luft entsteht. Die elektrische Festigkeit der Oxydschicht reicht hin, um niedrigen Spannungen zu widerstehen. Werden aber die Körner einer Überspannung ausgesetzt, so wird das Dielektrikum, d. i. die Oxydschicht, durchbrochen. Zwischen den Körnern springen kleine Fünkchen über, welche die einzelnen Körnchen lose aneinander schweißen, so daß der Strom einen ununterbrochenen Weg findet. Da die Hüttenleute

Fig. 72.



das oberflächliche Zusammenschweißen von Metallgries „Fritten" nennen, hat der Apparat nach dem Vorschlage von Reuleaux den Namen Fritter erhalten. Lodge hat ihn „Kohärer" genannt, nach dem lateinischen cohaerere = zusammenhängen. Durch die Erschütterung des Apparates werden die verschmolzenen Metallteilchen wieder auseinandergerissen, der Stromweg wird also unterbrochen; man sagt: der Apparat wird entfrittet. Die Elektroden des Fritters werden häufig aus Silber hergestellt und etwas abgeschrägt — wie in Fig. 73 —, teils um die Empfindlichkeit ändern zu können, teils damit die Entfrittung erleichtert wird. Zur Füllung ist u. a. ein Gemisch von Nickelkörnern und Silberkörnern benutzt worden; auch hat man Stahlelektroden und Stahlpulver verwendet. Die Glasröhre wird ausgepumpt, um ein stärkeres Oxydieren der Metallkörner zu verhüten.

Fig. 73.



Der Kohärer von Lodge-Muirhead enthält ein Rädchen aus Stahl, welches in Quecksilber eintaucht, das mit einer Petroleumschicht überdeckt ist. Das Rädchen, welches in dauernder Drehung erhalten wird, überzieht sich ebenfalls mit einer dünnen Schicht von Petroleum, so daß zwischen ihm und dem Quecksilber für gewöhnlich keine metallische Berührung besteht. Durch ankommende elektrische Wellen wird, wie beim gewöhnlichen Fritter, der unvollkommene Kontakt durchschlagen. Infolge der Umdrehung des Rädchens erfolgt die Entfrittung kontinuierlich.

Die Mikrophonkontakte. Im Gegensatz zu den Frittern lassen die Mikrophonkontakte den Strom dauernd durch. Werden sie von elektrischen Schwingungen getroffen, so nimmt ihr Übergangswiderstand in ganz unregelmäßiger Weise bald zu, bald ab. Mit einer Batterie und einem Relais in einen Stromkreis geschaltet, sind sie daher nicht geeignet, das Relais zu beeinflussen wie die Fritter; dagegen kann in Verbindung mit ihnen ein Telephon als Empfangsapparat gebraucht werden.

In Deutschland stand lange Zeit ein Empfangsapparat mit Mikrophonkontakt in der Ausführung von Dr. Köpsel in Verwendung. Der Mikrophonkontakt wurde bei dieser Anordnung aus einer auf Hochglanz polierten Stahlplatte und einer harten Graphitspitze gebildet.

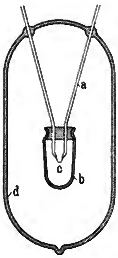
Der elektrolytische Wellendetektor. Das Prinzip ist folgendes: Werden die zwei dünnen Platindrähte einer mit verdünnter Schwefelsäure gefüllten Zersetzungszelle mit einer Batterie verbunden, so treten an den Drähten chemische Stoffumwandlungen ein, welche eine der elektromotorischen Kraft der Batterie entgegengesetzt gerichtete elektromotorische Kraft hervorrufen. Ist die EMK der Batterie etwas größer als die Gegenspannung, so tritt ein Strom ein. Reguliert man aber die äußere Spannung so, daß durch die Gegenspannung der Zelle ihr gerade das Gleichgewicht gehalten wird, so kommt der Strom nicht zustande. Wird nun die so vorgerichtete Zelle an geeigneter Stelle in einen empfangenden Resonator eingeschaltet, so wird sie von den ankommenden Wellen getroffen. Diese erleichtern den Eintritt der chemischen Zersetzung in der Flüssigkeit, begünstigen also den Eintritt des Stromes aus der Batterie. Dieser Strom kann durch einen mit der Zelle

in Reihe geschalteten Fernhörer wahrgenommen werden. Jeder im Resonator ankommende Wellenzug erzeugt daher im Fernhörer ein Geräusch.

Versuche haben gelehrt, daß die Empfindlichkeit der Zelle um so größer wird, je kleiner die Oberfläche der positiven Elektrode ist. Der wirksame Teil der positiven Elektrode hat eine Länge von 0,01 mm und einen Durchmesser von 0,001 mm. Bis jetzt ist es nicht gelungen, ein Relais mit der Zelle zu betreiben, wahrscheinlich deshalb, weil der hindurchgehende Strom sehr schwankt. In Verbindung mit einem Fernhörer aber leistet die Zelle vorzügliche Dienste.

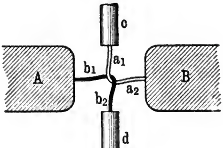
Das Hitzdrahtinstrument von Fessenden. Der Detektor von Fessenden besteht, wie Fig. 74 erkennen läßt, aus einer Drahtschleife *a* und zwei Glasbirnen, einer kleineren *b* und einer größeren *d*, in deren Wandungen die beiden Drähte der Schleife eingeschmolzen sind. Der als Wollastondraht bekannte Bimetalldraht enthält innen einen sehr dünnen Platinkern von 0,015 mm Durchmesser, und darüber einen 0,05 mm starken Mantel aus Silber. Innerhalb der luftleer gepumpten Glasbirne *b* ist der Silbermantel an der untersten Stelle *c* der Drahtschleife weggeätzt, so daß der Platinkern frei liegt. Diese Stelle, an welcher der Querschnitt des Drahtes sehr klein und der Widerstand sehr groß ist, wird, wenn die Drahtschleife in einen Resonator eingeschaltet ist, jedesmal stark erwärmt, sobald ein Wellenstrom hindurchfließt. Mit der Erwärmung des Drahtes ist eine Widerstandsveränderung verbunden. Wird nun die Drahtschleife gleichzeitig noch mit einem Fernhörer und einer Batterie in einen Stromkreis geschaltet, so ruft jeder im Resonator auftretende Strom eine Widerstandsänderung hervor, welche sich im Fernhörer bemerkbar macht. Um einen Wärmeverlust durch Strahlung nach Möglichkeit zu vermindern, ist die Glasbirne *b* in die zweite, innen versilberte größere Glasbirne *d* eingeschlossen.

Fig. 74.



Das Thermoelement von Klemencic beruht darauf, daß durch die Erwärmung einer Lötstelle, an welcher zwei verschiedene Metalle verbunden sind, eine EMK erzeugt wird. In Fig. 75 ist a_1—a_2 ein Draht aus Eisen und b_1—b_2 ein solcher aus Konstantan, Manganin oder Nikelin. Bei *A* und *B* werden die Zuführungen des Resonators, bei *c* und *d* die Zuführungen eines Galvanometers angeschlossen. Die im Resonator erregten Ströme fließen von *A* über b_1—a_2 nach *B* hin; hierbei wird die Berührungsstelle des Eisen- und Konstantandrahtes erwärmt und dadurch eine EMK erzeugt, welche von dem an die Enden *c* und *d* angeschlossenen Galvanometer angezeigt wird.

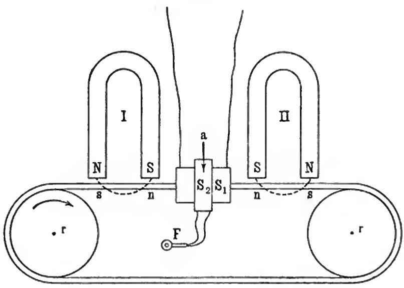
Fig. 75.



Der magnetische Detektor von Marconi. Die Einrichtung dieses Detektors ist in Fig. 76 schematisch dargestellt. Über die beiden Rollen *r*

ist ein Band ohne Ende aus gutem, möglichst homogenem Stahl gespannt, das überall gleichen Querschnitt besitzt. Eine aus isoliertem Kupferdraht gefertigte Spule S_1 ist so angeordnet, daß das Stahlband durch ihre innere Öffnung hindurchgeht. Rechts und links in gleichem Abstande von der Spule ist je ein starker Stahlmagnet angebracht, an deren Polen das Stahlband mittels der Rollen r vorübergeführt werden kann. Der Spule S_1 sind die gleichnamigen Pole der Magnete zugekehrt. Nehmen wir zunächst an, das Stahlband sei ohne jede Spur von remanentem Magnetismus und stehe still. Durch die beiden Magnete, deren Kraftlinienkreise durch punktierte Linien angedeutet sind, werden durch Verteilung in dem Stahlbande zwei kleine Magnete erzeugt, deren Pole mit den kleinen Buchstaben n und s bezeichnet sind. Der zwischen den Nordpolen n dieser magnetisierten Stücke belegene Teil des Stahlbandes, der sich mitten in der Spule S_1 an der Stelle a befindet, ist vollkommen ohne Magnetismus. Wird nun die obere Hälfte des Bandes von links nach rechts bewegt, so werden neue Teile der Wirkung der Magnete I und II ausgesetzt, die bereits magnetisierten werden aus dem Bereiche der Pole entfernt. Da das einmal magnetisierte Stahlband stets remanenten Magnetismus behält, ist nunmehr der am Punkte a jeweils befindliche Teil des bewegten Stahlbandes magnetisch.

Fig. 76.



Wie groß dieser Magnetismus ist, hängt von der Remanenz (Koerzitivkraft) der verwendeten Stahlsorte ab. Während der Drehung des Stahlbandes ist er aber stets gleich groß, sofern das Stahlband überall denselben Querschnitt besitzt und homogen ist.

Remanenter Magnetismus läßt sich beseitigen, wenn man das damit behaftete Stahlstück in eine Drahtspule bringt, durch welche ein Strom geschickt wird, dessen Polarität dauernd wechselt und der allmählich schwächer wird. Die Wirkung ist um so kräftiger, je schneller die Wechsel des Stromes sich folgen.

Ein solcher Vorgang spielt sich ab, wenn die Spule S_1 des Detektors mit den in der Abbildung angedeuteten Drahtenden in den Resonator eingeschaltet ist, sobald ein ankommender Wellenzug das ganze System durchfließt. Jeder Wellenzug ist ein Wechselstrom hoher Frequenz, der allmählich immer schwächer wird. Indem er die Spule S_1 durchfließt, vernichtet er oder schwächt er wenigstens den remanenten Magnetismus in dem Teile des Stahlbandes, der sich bei a gerade innerhalb der Spule befindet.

Außen um die Spule S_1 ist eine zweite Spule S_2 gewickelt, deren Wickelung mit dem Fernhörer F verbunden ist.

Wie nun in einer Spule mit festem Eisenkern durch Induktion Stromstöße entstehen, sobald der Magnetismus des Kerns in irgendwelcher Weise verändert wird, ebenso entstehen jedesmal in der Spule S_2 Stromstöße, die im Fernhörer F wahrzunehmen sind, wenn der Magnetismus des Stahlbandes an der Stelle a eine Veränderung erfährt. Da nun jeder ankommende Wellenzug diese Stärke ändert und dadurch im Fernhörer einen Ton hervorruft, wird der Empfang telegraphischer Zeichen möglich.

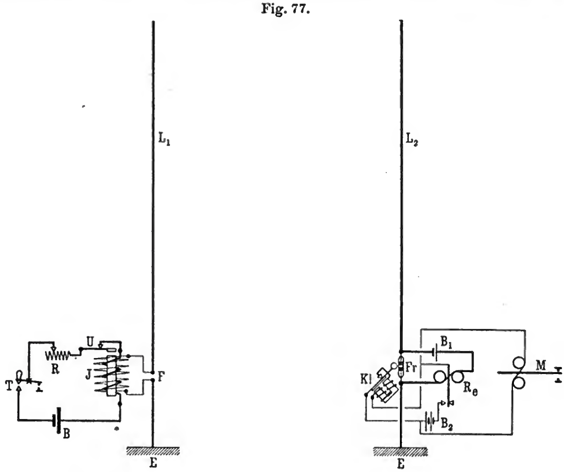
Die magnetische Ungleichheit in dem Stahlbande wird wieder ausgeglichen, wenn die betreffende Stelle an den Magneten II und I vorbeistreicht.

Der Magnetdetektor ist recht zuverlässig und empfindlich.

XVII. Elektrische Wellentelegraphie mit einfachen Schwingungssystemen.

Die technische Anwendung der physikalischen Vorgänge. Nachdem wir die wesentlichen Hilfsmittel kennen gelernt haben, die dazu

Fig. 77.



dienen, elektromagnetische Wellen an einem Orte zu erzeugen und auszusenden und an einem entfernten Orte zu empfangen und nachzuweisen, bietet es keine Schwierigkeiten mehr, zu verstehen, wie diese Einrichtungen zu einem System für drahtlose Telegraphie vereinigt werden.

Marconi errang die ersten Erfolge mit einer Anordnung, welche im wesentlichen der in Fig. 77 schematisch dargestellten entsprach.

L_1 ist der Oszillator des gebenden Amtes. Die eine Hälfte ist ein hoch in die Luft geführter Draht, die andere Hälfte ist durch die Erde ersetzt.

Die Spannung zu seiner Aufladung erzeugt das Induktorium J, welches primär aus der Batterie B mit unterbrochenem Gleichstrom gespeist wird. Zur Unterbrechung des Gleichstromes dient der Unterbrecher U. Dieser, ein Wagnerscher Hammer, tritt in Tätigkeit, sobald die Morsetaste T gedrückt wird. Mit jedem Tastendruck wird der Oszillator elektrisch geladen. Die Höhe der Induktorspannung ist von der Stärke des Stromes in der primären Induktorspule abhängig, die durch den Widerstand R reguliert werden kann. Erreicht die Induktorspannung einen bestimmten Wert, so springt zwischen den Elektroden der Funkenstrecke F ein Funke über. Die elektrischen Ladungen der beiden Oszillatorhälften gleichen sich durch den Funken aus, und es entstehen elektromagnetische Schwingungen, welche von dem Luftleiter unter Mitwirkung der Erde nach allen Richtungen hin ausgestrahlt werden. Diese Schwingungen klingen infolge der starken Dämpfung sehr bald ab, der Funke erlischt, und die Aufladung des Oszillators beginnt von neuem. Es vergeht jedoch, wie wir früher (a. S. 43) gesehen haben, bis zum Einsetzen des nächsten Funkens eine im Vergleich zur Dauer der Schwingungen lange Zeit. Der Luftleiter strahlt also nicht ununterbrochen elektromagnetische Wellen aus, sondern entsendet nur ganz kurze Wellenzüge in verhältnismäßig langen Zwischenräumen. Die Energie der ausgesandten Wellen wächst mit der Spannung zwischen den beiden Oszillatorhälften. Diese aber hängt von der Länge des Funkens ab, denn je weiter die Elektroden der Funkenstrecke voneinander entfernt sind, um so höher muß die Spannung sein, welche den Luftraum zwischen ihnen durchbricht. Der Funke hat also zwiefältige Bedeutung. Als selbsttätige Schaltvorrichtung verbindet und trennt er im geeigneten Augenblick die beiden Oszillatorhälften; außerdem gestattet er, mit dem Abstande der Elektroden die Energie der Schwingungen zu regulieren. Die vom Luftleiter ausgestrahlten elektromagnetischen Wellenzüge pflanzen sich in der durch Fig. 57 (S. 61) veranschaulichten Weise fort. Die Länge der ausgesandten Wellen für die Grundschwingung beträgt, wenn l die Länge des Luftleiters in Metern ist, nach der Gleichung [54] $4\,l$ Meter.

Der Resonator des empfangenden Amtes besteht aus einem mit Erde verbundenen Luftleiter L_2, welcher ebenso lang ist wie der Sendedraht des gebenden Amtes. An Stelle der Funkenstrecke ist ein Fritter Fr eingeschaltet, der dem Gleichstrom einen sehr hohen Widerstand bietet. Dem Wechselstrom gegenüber kann er als ein Kondensator aufgefaßt werden oder als eine Zahl von Kondensatoren, deren Belegungen durch die Metallkörner gebildet werden und deren Dielektrikum die Oxydschicht ist. Der Widerstand dieser Kondensatoren gegenüber dem Wechselstrom ist gleich $\frac{1}{C \,.\, 2\pi\nu}$, wenn C die gesamte Kapazität des Fritters bezeichnet. Diese ist jedoch so klein, daß die im Resonator erregten Schwingungen trotz ihrer hohen Periodenzahl in dem Fritter einen fast ebenso großen Widerstand finden, als wenn der Draht an dieser Stelle unterbrochen wäre. Solange daher die Oxydschicht zwischen den Metallkörnern noch nicht durchbrochen ist, bleibt der Luftleiter von der Erde isoliert. Die Wellenlänge seiner Eigenschwingungen ist daher gleich der doppelten Drahtlänge, d. i. gleich $2\,l$ Meter. Diese Wellen sind also nur halb so lang, wie die vom Sendedraht ausgestrahlten, so daß sich der Emp-

fänger mit dem Sender nicht in Resonanz befindet, sondern ganz erheblich gegen ihn verstimmt ist. Resonanz ist aber notwendig, wenn die Schwingungen im Empfänger so kräftig wie möglich ausfallen sollen. Sie tritt ein, sobald der Fritter anspricht und dadurch der Luftleiter mit der Erde verbunden wird. Da es von besonderer Wichtigkeit ist, gerade vor dem Ansprechen des Fritters recht kräftige Wellen zu erhalten, würde es notwendig sein, den Empfangsdraht doppelt so lang zu machen wie den Sendedraht. Dies würde aber verhindern, daß derselbe Draht sowohl zum Senden, wie zum Empfangen benutzt werden könnte. Man hilft sich damit, daß man den Draht, wenn mit ihm empfangen werden soll, derart mit Selbstinduktion und Kapazität verbindet, daß seine Eigenschwingung gleich derjenigen wird, in welcher er in der Sendeschaltung schwingt.

Sobald der Fritter unter dem Einfluß der ankommenden Wellen leitend geworden ist, wird das Relais R_e durch die Batterie B_1 zum Ansprechen gebracht. Dieses wiederum schließt die an die Batterie B_2 angeschlossenen Stromkreise des Morseapparates M und des Klopfers Kl. Der Klopfer enthält einen Elektromagneten, dessen Anker am Ende einen Hammer trägt, der unmittelbar nach dem Ansprechen des Relais auf die Frittröhre schlägt, um die Körner durch die Erschütterung zu entfritten. Das ist notwendig, damit die Dauer eines Zeichens nach Belieben abgegrenzt werden kann, denn die Leitfähigkeit des Fritters bleibt sonst bestehen, wenn auch die Einwirkung der Wellen schon aufgehört hat. Um die Entfrittung sicher zu stellen und nicht von einem einzelnen Schlage abhängig zu machen, ist der Klopfer als Selbstunterbrecher geschaltet, der so lange gegen den Fritter schlägt, als dieser Strom durchläßt. Fast möchte es unmöglich erscheinen, mit der beschriebenen Empfangseinrichtung Morsestriche zu erhalten, einesteils, weil der Fritter unmittelbar nach dem Ansprechen wieder entfrittet wird, andernteils, weil die ankommenden Wellen, wie auf S. 43 gezeigt ist, nicht ununterbrochen in einem Zuge, sondern merklich durch Absätze getrennt einander folgen; praktisch werden trotzdem bei geeigneter Einstellung aller Apparate zusammenhängende Striche erzielt, denn die einzelnen Erregungen des Elektromagneten im Morseapparate erfolgen so schnell, daß der Schreibhebel ihnen seiner Trägheit wegen nicht nachzukommen vermag.

Gebräuchliche Wellenlängen. Die Länge der vom Sendedraht ausgestrahlten Wellen wird im wesentlichen durch die Länge des Luftdrahtes bestimmt. Diese ist dadurch begrenzt, daß es praktisch nicht ausführbar ist, die Luftleiter über eine gewisse Höhe hinauszuführen, ohne entweder ihre Standfestigkeit zu gefährden oder die Kosten übermäßig zu steigern. Aus diesen Gründen ist man hinsichtlich der Periodenzahl der Schwingungen auf gewisse Grenzen beschränkt. Zwar haben wir gesehen, daß es mit Hilfe von Spulen gelingt, die Eigenperiode eines Luftleiters nach Belieben zu vergrößern; aber auch hiermit darf man nicht zu weit gehen. Der frei aufstrebende Luftleiter muß immer noch einen wesentlichen Teil des Schwingungssystems ausmachen, wenn die Ausstrahlung der Wellen so erfolgen soll, wie es die Theorie verlangt.

Die gebräuchlichen Wellenlängen schwanken zwischen 100 und 2000 m; das entspricht Zahlen von 3000000 bis 150000 Perioden in der Sekunde.

Abgestimmte Luftleiter. Die Entfernungen, welche Marconi bei seinen ersten Versuchen zu überbrücken vermochte, waren nicht sehr bedeutend. Das lag zum großen Teil daran, daß keine Abstimmung zwischen dem Sende- und Empfangsdraht vorhanden war. Die Resonanzerscheinungen sind für die elektrische Wellentelegraphie jedoch von der größten Wichtigkeit, denn wir haben gesehen, daß die Wirkung der Schwingungen erst durch Resonanz voll entwickelt wird.

Ohne Rücksicht auf ihre Länge werden die auftreffenden Wellen einen Luftleiter zu Schwingungen anregen. Die so erzwungenen Schwingungen sind zuweilen stark genug, einen Detektor zu erregen, wenn Sender und Empfänger nicht weit auseinander liegen und wenn die ausgestrahlten Wellen besonders kräftig sind. Bei größerer Entfernung jedoch wird die Wirkung der ankommenden Wellen so schwach, daß der Wellenanzeiger nicht mehr anspricht. Bestimmt man aber die elektrischen Eigenschaften des Empfangsdrahtes derart, daß die Periode seiner Eigenschwingungen gleich derjenigen der ankommenden Wellen ist, so werden diese, auch wenn sie nur schwach sind, doch die Eigenschwingungen immer kräftiger anregen, weil sie mit ihnen in gleichem Rhythmus wirken. Die Empfänger sprechen bei einer solchen Abstimmung der Luftleiter daher auf weit größere Entfernungen und kleinere Energiemengen an.

Mehrfachtelegraphie. Die eben erwähnte Ausnutzung der Resonanz bringt noch einen anderen Vorteil mit sich. Da die elektrischen Wellen sich von einem Luftleiter aus nach allen Richtungen hin ausbreiten, möchte es zunächst nicht möglich erscheinen, daß in dem Bereich einer Station gleichzeitig auch andere Stationen betrieben werden, weil die von einem Sender ausgehenden Wellen in allen im Kreise um ihn vorhandenen Empfängern Schwingungen zu erzeugen suchen. Der auf eine gewisse Wellenlänge abgestimmte Luftleiter aber wird nur noch von den gerade für ihn bestimmten Wellen kräftig erregt. Alle übrigen Wellen drücken ihm zwar auch erzwungene Schwingungen auf, die aber zu schwach sind, um vom Detektor angezeigt zu werden. Auf diese Weise wird es möglich, im Bereiche einer größeren Anzahl von Stationen je zwei gleichzeitig miteinander verkehren zu lassen, ohne daß sie von den übrigen gestört werden, wenn nur für jede dieser Stationen die Wellenlänge besonders festgestellt und verabredet ist, welche im Verkehr mit ihr angewendet werden soll.

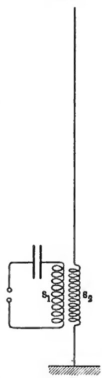
XVIII. Gekoppelte Schwingungssysteme.

Energieverhältnisse im geschlossenen und im offenen Oszillator. Als einen wesentlichen Unterschied zwischen dem offenen und dem geschlossenen Oszillator haben wir die kräftige Energiestrahlung des ersteren gegenüber der sehr geringen Fernwirkung des letzteren kennen gelernt. Ein weiterer Unterschied von großer Bedeutung für ihre praktische Verwendung besteht hinsichtlich der bei einer Schwingung in Bewegung gesetzten Energiemengen. Die von einem Kondensator bei der Ladung auf das Potential E aufgenommene Energie ist nach der Gl. [43] und der Fußnote auf S. 32 gleich

$\frac{CE^2}{2}$. Unter sonst gleichen Umständen ist sie daher von der Kapazität abhängig. Die Kapazität eines Plattenkondensators oder einer Leydener Flasche ist ganz erheblich größer als diejenige eines gestreckten Leiters. Da nun einerseits eine kräftige Ausstrahlung, andererseits eine recht intensive Schwingung für eine möglichst weite Fernwirkung wünschenswert sind, liegt es nahe, die beiden Erregersysteme miteinander zu verbinden, zu koppeln. Professor Dr. F. Braun hat die gekoppelten Sender zuerst in die drahtlose Telegraphie eingeführt.

Koppelung zweier Schwingungssysteme; ihre Wechselwirkungen aufeinander. Eine Art von Koppelung ist in Fig. 78 dargestellt. Durch zwei übereinander gewickelte Spulen s_1 und s_2 werden, wie bei einem Transformator, die Schwingungen von dem geschlossenen auf das offene System übertragen. Bei einer derartigen Kombination von zwei Schwingungssystemen liegen die elektrischen Verhältnisse jedoch nicht mehr so einfach, wie bei einem einzigen System. Die sekundäre Spule unterliegt nicht nur der Induktion durch die primäre Spule, es übt auch der in der sekundären Spule kreisende Induktionsstrom selbst wieder rückwirkend einen ähnlichen Einfluß auf die primäre Spule aus, wie folgende Überlegung zeigt. Wird der geschlossene Schwingungskreis durch den Anschluß eines Induktoriums an die Funkenstrecke erregt, so fließt ein Wechselstrom durch die Spule s_1, welcher ein magnetisches Wechselfeld hervorruft, dessen Kraftlinien sowohl die Spule s_1 als auch die um s_1 herumgelegten Windungen der Spule s_2 durchsetzen. Hierdurch werden gleichzeitig in s_1 und in s_2 elektromotorische Kräfte erzeugt, welche gegenüber dem Strom um 90° in der Phase[1]) zurückbleiben. Es ist dieses in der primären Spule die EMK der Selbstinduktion und in der sekundären Spule die EMK der gegenseitigen Induktion. Diese letztere EMK hat in s_2 und in dem mit s_2 verbundenen Luftleiter einen Wechselstrom zur Folge, welcher hinter der EMK wiederum um 90°, also hinter dem Strom der Primärspule um 180° zurückbleibt. Der Wechselstrom in der sekundären Spule ist daher dem Strome in der Primärspule in jedem Augenblick entgegengesetzt gerichtet. Der sekundäre Strom ist nun ebenfalls von einem magnetischen Felde umgeben. Da dieses dem Primärfelde entgegengesetzt gerichtet ist, vermindert es dessen Stärke; das bedeutet aber eine Verminderung der EMK der Selbstinduktion des primären Kreises und somit eine Verminderung der Eigenschwingungszahl für diesen Kreis. Diese Einwirkung ist um so kräftiger, je stärker die Ströme in dem sekundären System sind.

Fig. 78.



Koppelungsgrad; feste und lose Koppelung. Die gegenseitige Beeinflussung der beiden Spulen steht in innigem Zusammenhange mit der

[1]) 90° trifft streng genommen nur zu, wenn von Energieverlusten (von der Wattkomponente) abgesehen wird.

Stärke und Ausdehnung des magnetischen Feldes. Das vom Primärstrom erzeugte Magnetfeld ist um so größer, je größer der Selbstinduktionskoeffizient L_1 der Spule s_1 ist. In ähnlicher Weise, wie dieser nach der früher (S. 16) gegebenen Definition die Zahl der von der Stromeinheit erzeugten magnetischen Kraftlinien angibt, soll durch einen Faktor M bestimmt werden, wieviele dieser Kraftlinien in der benachbarten Spule wirksam werden. Je größer bei feststehenden Selbstinduktionswerten beider Spulen M im Vergleich zu L_1, also je größer $\frac{M}{L_1}$ ist, um so mehr magnetische Kraftlinien der primären Spule durchsetzen auch die Spule s_2, um so größer ist die in s_2 erzeugte EMK. Dieselbe Betrachtung gilt für die Rückwirkung der sekundären Spule auf die primäre. Bezeichnet L_2 den Selbstinduktionskoeffizienten der zweiten Spule, so gilt, da M für diesen Fall dieselbe Größe wie vorher hat, die Beziehung, daß die Rückwirkung der zweiten Spule um so größer ist, je größer $\frac{M}{L_2}$ ist. Die Gesamtwirkung beider Spulen aufeinander ist daher proportional dem Faktor $\frac{M^2}{L_1 \cdot L_2}$. Die Wurzel aus diesem Ausdruck wird als Koppelungskoeffizient

$$k = \sqrt{\frac{M^2}{L_1 \cdot L_2}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad [59]$$

bezeichnet. Werden die Systeme so angeordnet, daß möglichst viele der in dem einen erzeugten magnetischen Kraftlinien in dem anderen zur Wirkung kommen, so wird M groß; der Koppelungsfaktor k ist daher in diesem Falle auch groß, die Koppelung **fest**; im entgegengesetzten Falle heißt die Koppelung **lose**.

Doppelschwingungen in gekoppelten Systemen. Bei gekoppelten Systemen haben wir es also nicht mit einer durch die Werte von C und L der einzelnen Schwingungssysteme allein bestimmten Schwingung zu tun. In ähnlicher Weise, wie infolge der Rückwirkung der sekundären Spule die Selbstinduktion des Primärkreises vermindert und damit seine Wellenlänge verkürzt wird, kann diese auch verlängert werden. So lehrt die Theorie nach der mathematischen Anwendung der Schwingungsgesetze, daß bei der Koppelung zweier Schwingungssysteme zwei verschiedene Schwingungen entstehen [1]). Die gekoppelten Erreger sind als ein System mit zwei verschiedenen Eigenschwingungen aufzufassen und zwar treten die beiden Schwingungen auch dann auf, wenn die einzelnen Systeme vorher genau auf dieselbe Schwingungszahl abgestimmt sind. Die Verschiedenheit der beiden Wellen ist in diesem Falle um so größer, je fester die Koppelung ist, denn dann ist auch der sekundäre Strom und seine Rückwirkung um so größer. Bezeichnet λ_0 die Wellenlänge der beiden Systeme vor der Koppelung, so sind die nach der Koppelung entstehenden Wellen λ_1 und λ_2 durch die Gleichungen bestimmt:

[1]) Vgl. G. Seibt, E. T. Z. 1902, S. 387 ff.; ferner M. Wien, Ann. d. Phys. 8, 186, und Drude, ebend. 13, 512.

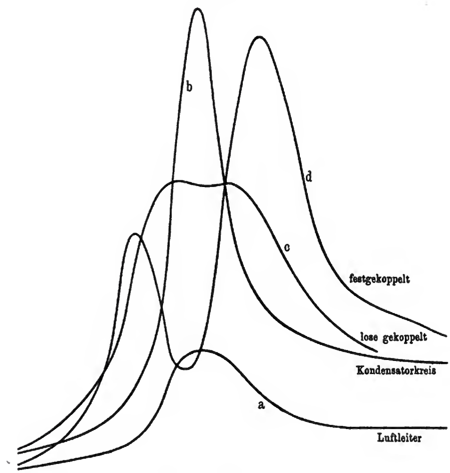
$$\lambda_1 = \lambda_0 \sqrt{1+k} \quad \ldots\ldots\ldots \quad [60]$$

und

$$\lambda_2 = \lambda_0 \sqrt{1-k} \quad \ldots\ldots\ldots \quad [61]$$

Mit Hilfe eines Wellenmessers läßt sich dieses Ergebnis der Theorie in der Praxis nachweisen. Fig. 79 zeigt z. B. unter *a* und *b* die mit einem Dönitzschen Wellenmesser aufgenommenen Resonanzkurven eines offenen und eines geschlossenen Schwingungssystems. Die Maxima der beiden Kurven liegen in derselben Senkrechten, ein Beweis dafür, daß die Resonanz mit dem Wellenmesser in jedem Falle bei derselben Einstellung des Wellenmessers eingetreten ist. Die Schwingungszahl beider Systeme war also vor der

Fig. 79.



Koppelung dieselbe. Im übrigen bestätigt die flache Form der Kurve *a*, daß der offene Sender stark gedämpft ist infolge der Strahlung, während die steil ansteigende Spitze der Kurve *b* des Kondensatorkreises lehrt, daß bei dessen geringer Dämpfung die Resonanzlage viel genauer bestimmt und daß die Energie der Schwingungen wesentlich größer ist. Wurden beide Erreger lose gekoppelt, so ergab sich die Kurve *c*, wurden sie fester gekoppelt, die Kurve *d*. Beide Kurven zeigen ein Maximum links, ein zweites rechts von der Resonanzlage. Jedesmal entstehen durch die Koppelung zwei Wellen, von denen die eine länger, die andere kürzer als die ursprüngliche Welle der einzelnen Systeme ist. Wird die Koppelung loser, so nähern sich die Periodenzahlen der beiden Schwingungen immer mehr, so daß die Kurve *c* bei sehr loser Koppelung die Maxima nur noch ganz undeutlich erkennen läßt.

Praktische Anwendung der Koppelung. Bei fester Koppelung wird eine größere Energiemenge aus dem primären System auf das sekundäre übertragen als bei loser; gleichzeitig ist der Unterschied in der Frequenz der neu entstehenden Wellen bei der festen-Koppelung größer. Fest gekoppelte Sender strahlen kräftigere Schwingungen aus. Je loser die Koppelung wird, um so geringer wird die Energieübertragung, um so mehr nähern sich aber die beiden Wellen des Systems in ihrer Periodenzahl. Soll ein gekoppeltes System auf eine gegebene Wellenlänge abgestimmt werden, so wird dies mit um so besserem Erfolge erreicht, je loser die Koppelung ist. In der Praxis wird man feste Koppelung hiernach da verwenden, wo zur Überbrückung großer Entfernungen auf die Entsendung möglichst kräftiger Wellen Wert gelegt wird. Handelt es sich jedoch darum, in demselben Bereiche mehrere Stationen gleichzeitig störungsfrei zu betreiben, so wird man im Interesse einer schärferen Abstimmung lose koppeln und sich dafür mit geringeren Energiemengen begnügen.

Dämpfung gekoppelter Systeme. Die Dämpfungskoeffizienten der in Fig. 78 (S. 85) vereinigten Schwingungssysteme sind sehr verschieden voneinander. Werden die Systeme einzeln erregt, so klingen die Schwingungen des Luftleiters viel schneller ab, als diejenigen des geschlossenen Kondensatorkreises. Die letzteren besitzen noch sehr hohe Energie, wenn die ersteren schon erloschen sind, so daß sich der Kondensatorkreis gewissermaßen im Übergewicht befindet. Die Folge hiervon ist, daß auch bei einer Koppelung beider Systeme die resultierenden Wellen viel kräftiger sind, als die des einzeln erregten Luftleiters. Die Dämpfung des offenen Senders wird also durch die Koppelung vermindert; die neu entstehenden Wellen besitzen eine Dämpfung, welche derjenigen der geringer gedämpften ursprünglichen Welle nahe kommt.

Gekoppelte Empfänger. Für die praktische Verwendung gekoppelter Sender ist das Auftreten von zwei verschiedenen Wellen sehr störend. Wir haben gesehen, daß es von wesentlichem Nutzen ist, wenn man Sender und Empfänger auf gleiche Wellenlänge abstimmt. Sind nun zwei Wellen vorhanden, so würde man die kräftigste Wirkung erwarten dürfen, wenn der Empfänger beide Wellen aufnehmen, also auf zwei Wellen abgestimmt werden könnte, denn in diesem Falle würde die ausgestrahlte Energie möglichst vollkommen ausgenutzt sein. Gekoppelte Empfänger schwingen nun zwar ebenso wie gekoppelte Sender in zwei verschiedenen Wellen; es bietet aber große praktische Schwierigkeiten, einen solchen Empfänger auf zwei genau vorgeschriebene Wellenlängen abzustimmen [1]). Zumeist wird man sich damit begnügen müssen, den Empfänger auf eine der beiden ankommenden Wellen einzustellen.

Die Koppelung zwischen zwei Schwingungssystemen kann als magnetische, elektrische und galvanische Koppelung ausgeführt werden.

Magnetische Koppelung. Die Übertragung durch zwei übereinander gewickelte Spulen (Fig. 78, S. 85) beruht darauf, daß beide Spulen der Wir-

---

[1]) Vgl. hierzu G. Seibt, E. T. Z. 1904, S. 1111.

kung desselben Magnetfeldes unterliegen; sie heißt daher die **magnetische** Koppelung.

Elektrische Koppelung. Als **elektrische Koppelung** wird eine solche bezeichnet, bei welcher die Übertragung der Energie nicht durch die Vermittelung eines Magnetfeldes, sondern durch ein elektrisches Feld erfolgt, wie es sich z. B. zwischen den Platten eines Kondensators ausbildet. Eine Anordnung mit elektrischer Koppelung ist die in Fig. 80 gezeigte. Die elektrischen Kraftlinien, welche bei der Erregung der Kondensatoren C_1 und C_2 durch die Schwingungen des geschlossenen Kreises entstehen, erzeugen die Schwingungen in dem offenen Sender. Der Grad der Koppelung wird durch den Plattenabstand der Kondensatoren C_1 und C_2 bestimmt. Die reine elektrische Koppelung wird kaum angewendet.

Fig. 80.



Fig. 81.

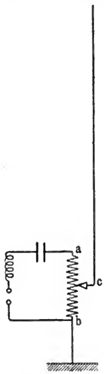
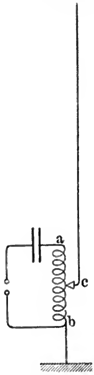


Fig. 82.



Galvansiche Koppelung. Bei der galvanischen Koppelung ist für die Übertragung der Schwingungen von dem einen auf das andere System weder ein magnetisches noch ein elektrisches Feld wirksam; sie erfolgt unmittelbar durch Stromübergang. Die galvanische Koppelung ist jedoch niemals allein wirksam, weil immer auch Selbstinduktion und Kapazität vorhanden sind. Wollen wir jedoch, um den Begriff zu erläutern, von Selbstinduktion und Kapazität einmal ganz absehen, so kann Fig. 81 als ein **Schema für die galvanische Koppelung** angesehen werden, die unmittelbar durch Stromübergang bewirkt wird.

Es sei a—b ein von allen magnetischen Wirkungen freier Widerstand R, z. B. ein Graphitstift, von welchem beide Systeme einen Teil gemeinsam besitzen. Denken wir uns den Widerstand R von einem Gleichstrom J durchflossen, so herrscht zwischen den Punkten a und b ein Spannungsunterschied E, der sich nach dem Ohmschen Gesetz auf $E = J.R$ berechnet.

Der Spannungsunterschied zwischen *b* und *c* ist kleiner als der zwischen *b* und *a*; er ist dem Widerstande des durch Anlegen der Drähte bei *b* und *c* abgeteilten Stückes proportional. Auf diese Weise lassen sich beliebige Spannungen zwischen *a* und *b* abgreifen. Wenn Wechselströme das geschlossene System durchfließen, wirkt diese Anordnung ebenso wie bei Gleichstrom; sie gestattet die Übertragung der Schwingungen von dem geschlossenen auf das offene System mit beliebig gewählter Spannung.

Eine Vereinigung der magnetischen und der galvanischen Koppelung zeigt Fig. 82 (a. v. S.). An die Stelle des induktionsfreien Widerstandes *a*—*b* der Fig. 81 ist hier eine Selbstinduktionsrolle getreten. Die Wirkung einer solchen Übertragung beruht indessen fast ausschließlich auf der magnetischen Koppelung; gegen sie ist der Einfluß der galvanischen sehr klein.

Die magnetische Wirkung würde unverändert sein, wenn der Erd- und der Luftdraht bei *b* und *c* nicht unmittelbar an die Spule angeschlossen wären, sondern wenn über die Spule *b*—*a* bis *c* eine zweite Spule aufgewickelt und mit dem offenen Oszillator verbunden würde, die ebenso viele Windungen enthielte, wie die erste zwischen *b* und *c* hat. In dieser Form wäre die Anordnung der in Fig. 78 a. S. 85 dargestellten ähnlich. Die zweite Spule wird jedoch in der nach Fig. 82 geschalteten Anordnung gespart. Diese Schaltung findet häufig in der Praxis Verwendung.

XIX. Ungedämpfte Schwingungen.

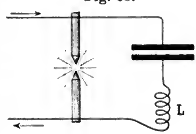
Der tönende Flammenbogen. Durch die Fig. 31 auf S. 43 ist gezeigt worden, wie die elektromagnetischen Schwingungen, welche durch ein Induktorium in einem Oszillator erzeugt werden, nicht ununterbrochen fortbestehen, sondern in einzelnen Wellenzügen auftreten, deren zeitliche Zwischenräume im Vergleich zu der Dauer eines Wellenzuges sehr groß sind. Infolge der Dämpfung der Schwingungen durch die Verluste im Schwingungskreise selbst wie durch die Ausstrahlung elektrischer Energie nimmt die Spannung sehr schnell so weit ab, daß sie den, die leitende Brücke zwischen den Oszillatorhälften bildenden Funken nicht mehr aufrecht zu erhalten vermag. Wollte man eine ununterbrochene Reihe gleich starker Schwingungen erhalten, so müßte man jeder einzelnen so viel Energie, als sie infolge der Dämpfung abgegeben hat, wieder zuführen. Schon früher haben wir darauf hingewiesen, daß dieses mit einem Induktorium nicht zu erreichen ist. Untersuchungen des englischen Physikers W. Duddel lehren jedoch, wie es mit Hilfe des Flammenbogens einer elektrischen Bogenlampe gelingt, die Verluste der einzelnen Schwingungen sofort wieder zu ersetzen.

Wird ein elektrischer Lichtbogen ausgeblasen, z. B. durch einen Kohlensäurestrom oder durch magnetische Ablenkung des Lichtbogens, so behält der mit leitenden Gasen erfüllte Raum zwischen den Lampenelektroden noch eine kurze Zeit hindurch so viel Leitfähigkeit bei, daß der ausgelöschte Lichtbogen, wenn die löschende Ursache rechtzeitig zu wirken aufhört, von selbst wieder einsetzen kann, ohne daß es hierzu der wiederholten Berührung der Elektroden bedarf. Löscht man nun den Bogen immer im passenden Augenblick aus, so wird er immer wieder aufleuchten und zwar bei günstigen Bedingungen in so schneller Aufeinanderfolge, daß die mit den Temperatur-

schwankungen des Lichtbogens verbundenen Erschütterungen der Luft einen Ton hervorrufen. Während seiner Untersuchungen über die Einwirkung von Stromschwankungen auf den Lichtbogen fand Duddel[1]), daß der Gleichstrombogen zwischen homogenen Kohlen ganz von selbst zu tönen begann, wenn parallel zu ihm eine Kapazität mit einer in Reihe geschalteten Selbstinduktion gelegt wurde, wie es Fig. 83 zeigt. Die Töne treten auf, auch wenn der Speisestrom vollkommen konstant gehalten und der Flammenbogen gegen alle äußeren Einwirkungen sorgfältig geschützt wird.

Diese Erscheinung wird durch das Entstehen von elektromagnetischen Schwingungen erklärt, welche von dem parallel zur Lampe liegenden Kondensator ausgehen und sich dem Lampenstrom überlagern. Daß in einem ähnlich wie in Fig. 83 parallel zu einer Bogenlampe geschalteten Kondensatorkreise Schwingungen erregt werden, hat auch Elihu Thomson bereits 1892 nachgewiesen[2]). Energieverluste der einzelnen Schwingungen werden hierbei durch Zufuhr aus der Stromquelle sofort ersetzt, weil die Lampenspannung den Kondensator immer wieder auflädt.

Fig. 83.



Es entsteht so ein Wechselstrom, der den Lampenstrom periodisch schwächt und verstärkt. Bei gleichbleibendem Elektrodenabstand haben diese Stromschwankungen Änderungen im Volumen der Gasschicht des Lichtbogens zur Folge, wodurch die umgebende Luft in bestimmtem Rhythmus abwechselnd verdünnt und verdichtet wird, so daß Schallwellen entstehen.

Die Höhe des erzeugten Tones richtet sich nach der Frequenz des übergelagerten Wechselstromes und diese wiederum wird im wesentlichen durch die Eigenschwingungszahl des Kondensatorkreises bestimmt. Durch Veränderung der parallel zum Lichtbogen liegenden Kapazität und Selbstinduktion kann man die sekundliche Schwingungszahl und damit die Tonhöhe in sehr weiten Grenzen ändern. Duddel hat bis zu 40000 Schwingungen in der Sekunde erzielt.

Erklärung für das Auftreten der Kondensatorschwingungen[3]). Das Gelingen des Duddelschen Versuches wird durch die Widerstandsverhältnisse im Lampenbogen wesentlich beeinflußt. In einer brennenden Bogenlampe entsteht zwischen den beiden Kohlen eine Schicht von heißen Gasen und Dämpfen, welche den Strom leitet. Die Leitfähigkeit dieser Schicht steigt, wie diejenige der nichtmetallischen Leiter, mit der Temperatur. Die mit dem Quadrate der Stromstärke wachsende Temperatur verursacht nämlich eine intensivere Verdampfung der Kohle, so daß die Gasschicht, weil sie dichter wird und an Querschnitt gewinnt, an Widerstand verliert. Diese Widerstandsverminderung ist so bedeutend, daß die Spannung zwischen den beiden Kohlen trotz der erhöhten Stromstärke sinkt; sie steigt wieder, wenn der Strom abnimmt.

---

[1]) The Electrician 1900, p. 266 u. 310. — [2]) The Electrical Review, London, 5, 986 (21. Dez. 1906). — [3]) Vgl. hierzu Sachulka, Elektrotechnik und Maschinenbau, Wien 1907, S. 91; Dr. M. Reithofer, E. T. Z., Berlin 1907, S. 308.

Wird die Bogenlampe eingeschaltet, so bleibt nach den Untersuchungen von Duddel ihr Widerstand im ersten Augenblick zwar konstant, so daß mit dem Strome auch der Spannungsabfall wächst. Dieses dauert aber höchstens $^1/_{5000}$ Sekunde. Danach fällt die Spannung mit steigender Stromstärke.

In dem Augenblick, in welchem die Selbstinduktionsspule L und der Kondensator C (Fig. 83 auf S. 91) parallel zur Lampe an den Stromkreis angeschlossen werden, fließt in derselben Richtung mit dem durch die Pfeile angedeuteten Speisestrom ein Ladestrom in den Kondensator hinein, bis dieser auf dieselbe Spannung geladen ist, welche zwischen den beiden Kohlen herrscht. So lange diese Spannung unverändert bleibt, behält auch der Kondensator seinen elektrischen Zustand bei. Die Lampenspannung bleibt sich aber nicht dauernd gleich. Sie ist immer geringen Schwankungen unterworfen, die durch Unregelmäßigkeiten im Gange der Speisemaschine, durch das Abbrennen der Kohlen oder irgendwelche andere Umstände verursacht werden. Steigt z. B. die Spannung an den Kohlen, wenn auch um einen sehr kleinen Wert, so strömt sofort Elektrizität in den Kondensator. Ein positiver Ladestrom fließt von der oberen Kohle nach rechts, ein negativer von der unteren ebenfalls nach rechts durch die Selbstinduktionsrolle L, um den Kondensator auf das höhere Potential zu laden. Während dieser Bewegung der Elektrizität bewirkt jedoch die vorgeschaltete Spule, daß die Spannung an den Belegungen des Kondensators noch höher steigt als an den Kohlen der Lampe.

Das ist ein Vorgang, der uns aus den Betrachtungen über Resonanzerscheinungen bekannt ist. Wir hatten z. B. auf S. 30 gesehen, daß in einem Stromkreise, der eine Wechselstromquelle, eine Selbstinduktion und eine Kapazität in Reihe enthält, die Spannung an den Belegungen des Kondensators höher war, als an den Polen der stromliefernden Maschine, und daß diese Wirkung noch durch Abstimmung auf Resonanz erheblich gesteigert werden kann. So übersteigt auch die Spannung am Kondensator diejenige an den Kohlen der Lampe. Infolgedessen setzt ein Entladungsstrom ein, der von der oberen Kondensatorplatte nach links durch den Lichtbogen und die Selbstinduktionsrolle zur unteren Platte fließt.

Wäre der Lichtbogen durch einen festen Widerstand ersetzt, an dessen Enden eine konstante Spannung besteht, so würde sich der Kondensator bis auf das zwischen den beiden Kohlen herrschende Potential entladen. Sind die Widerstandsverhältnisse günstig, so können bei dieser Entladung gedämpfte Schwingungen entstehen, deren Periodenzahl sich nach den Werten von C und L richtet. Nach dem Abklingen dieser Schwingungen wäre alsdann alles in Ruhe. In Wirklichkeit bleibt aber das Potential der beiden Kohlen nicht konstant. Der Entladungsstrom hat in der Lampe dieselbe Richtung wie der Speisestrom; er verstärkt daher den Strom im Lichtbogen. Hierdurch wird aber die Spannung zwischen den beiden Kohlen vermindert, so daß der Kondensator noch weiter entladen werden muß, um das Potential der Kohlen zu erreichen. Durch die Wirkung der Spule L vermindert sich die Kondensatorspannung jedoch noch mehr, was sofort verständlich wird, wenn man die Entladung als eine Aufladung im entgegengesetzten Sinne betrachtet. Der so erreichte Zustand ist aber auch nicht stationär, denn immer wieder suchen sich die Spannungsunterschiede auszugleichen. Die höhere Spannung

des Lichtbogens verursacht von neuem die Aufladung des Kondensators. Der Ladestrom indessen, welcher die Elektrizität von der unteren Kondensatorplatte durch die Selbstinduktionsspule und die Lampe zu der oberen Platte führt, hat in dem Flammenbogen eine dem Speisestrom entgegengesetzte Richtung. Hierdurch wird der Lampenstrom geschwächt und die Lampenspannung erhöht. Diese Spannungserhöhung hat wiederum eine weitere Ladung des Kondensators zur Folge.

So sehen wir, wie positive und negative Elektrizität von der einen zur anderen Kondensatorplatte durch den Lichtbogen und die Selbstinduktionsspule hin und her schwingt. Im Lichtbogen tritt mit jeder Schwingung entweder eine Spannungserhöhung oder eine Spannungserniedrigung ein, welche im gleichen Sinne mit der Schwingung wirkt und ihr stets neue Energie zuführt. Die Schwingungen werden um so kräftiger ausfallen, je lebhafter die Spannungsänderung im Lichtbogen ist, die infolge einer Stromänderung eintritt. Durch die regelmäßige Energiezufuhr werden Verluste, welche durch Dämpfung entstehen, jedesmal wieder ersetzt, so daß eine Dämpfung gar nicht in die Erscheinung tritt. Schwingungen dieser Art sind daher ungedämpfte Schwingungen genannt worden.

Die Periodenzahl der ungedämpften Schwingungen. Die Zeit, welche die Elektrizität für den Weg von der einen Platte zur anderen gebraucht, wird durch die Kapazität des Kondensators C und durch die Selbstinduktion der Spule L sowie durch den auf jenem Wege zu überwindenden Widerstand bestimmt. Annähernd gilt[1]) für die in solchem Kreise auftretenden Schwingungen die Gleichung [42], welche die Dauer einer Periode angibt. Der Ohmsche Widerstand des Kreises wirkt jedoch auf die Schwingungen verzögernd ein, wie die Gleichung [50] lehrt.

Außerdem ist der Widerstand, welchen der Lichtbogen selbst den durch die Stromänderungen hervorgerufenen Spannungsänderungen entgegensetzt, von großer Bedeutung. Dieser Widerstand wird wesentlich durch die Beschaffenheit des Gases beeinflußt, in welchem der Flammenbogen brennt. Duddel konnte z. B. mit einer in Luft brennenden Lampe nicht mehr als 40 000 Schwingungen in der Sekunde erzielen, weil die Lichtbogenspannung bei höheren Periodenzahlen den Stromschwankungen nicht mehr zu folgen vermochte. Die Ursache hierfür ist folgende: Veränderungen in der Stärke des Speisestromes rufen, wie wir oben erörtert haben, gleichsinnige Veränderungen der Temperatur der zwischen den beiden Kohlen bestehenden heißen Dampfschicht hervor, deren Folge die für die Erhaltung der ungedämpften Schwingungen notwendigen Widerstands- und Spannungsschwankungen sind.

Ist der Flammenbogen von Luft umgeben, so wird, weil Luft die Wärme schlecht leitet, seine Abkühlung erschwert und verzögert. Durch fortgesetztes Verkleinern der Kapazität und der Selbstinduktion kann eine derart hohe Frequenz der dem Lampenstrome übergelagerten Schwingungen herbeigeführt werden, daß der Lichtbogen nicht mehr Zeit genug findet, sich während der Verminderung der Stromstärke abzukühlen, bevor deren Verstärkung wieder eintritt. Bei einem gewissen Werte der Kapazität und der

[1]) Meisel, Phys. Zeitschr., 4. Jahrg. 1903, S. 532; Simon, ebenda, 7. Jahrg. 1906, S. 433.

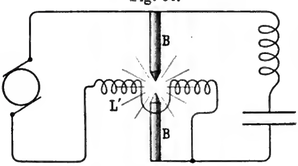
Selbstinduktion wird der Zustand erreicht, daß die Temperatur, der Widerstand und die Spannung des Lichtbogens unverändert bleiben und anhaltende Schwingungen nicht mehr auftreten.

Ersetzt man die Luft durch ein die Wärme gut leitendes Gas, z. B. durch Wasserstoff, so verlieren die heißen Dämpfe ihre Wärme viel schneller und es werden auch bei sehr schnell aufeinander folgenden Schwankungen der Stromstärke im Lichtbogen noch ausreichende Verminderungen und Erhöhungen der Spannung eintreten. In diesem Falle können die Kapazität und die Selbstinduktion des Kreises noch wesentlich weiter vermindert werden, ohne daß das Auftreten von Schwingungen unmöglich wird. Die Frequenz der unter solchen Umständen entstehenden Schwingungen ist infolge der geringeren Kapazität und Selbstinduktion des parallel zur Lampe liegenden Kreises entsprechend höher, als in dem vorher behandelten Falle.

An Stelle des zwischen zwei Lampenkohlen in Wasserstoff brennenden Lichtbogens kann auch eine mit Wasserstoff gefüllte Geißlersche Röhre treten [1]), wie sie Righi schon in den Jahren 1901 und 1902 zur Erzeugung ungedämpfter Schwingungen benutzt hat.

Dem Ingenieur Valdemar Poulsen in Kopenhagen ist es gelungen, die Periodenzahl der Schwingungen bis auf eine Million und mehr dadurch zu steigern [2]), daß er den zwischen Kohlestäben erzeugten Lichtbogen in Wasserstoff oder wasserstoffhaltiger Atmosphäre brennen ließ. Dieser Erfolg ist nach Poulsens Ansicht hauptsächlich der abkühlenden Wirkung des Wasserstoffs zuzuschreiben. Auch mit einer in Luft brennenden Bogenlampe erhält man Schwingungen von sehr hoher Frequenz, wenn die Elektroden aus einem die Wärme gut leitenden Metall, z. B. aus Kupfer, hergestellt und durch Wasser gekühlt werden.

Fig. 84.



Die Energie der ungedämpften Schwingungen kann wesentlich gesteigert werden, wenn um den Lichtbogen ein starkes Magnetfeld erzeugt wird, denn damit wird der Flammenbogen von seiner kürzesten Bahn zwischen den Elektroden abgelenkt. Die hierdurch bewirkte Verlängerung des Bogens bedeutet eine Vermehrung seines Widerstandes und diese verursacht, wenn der Speisestrom auf gleicher Höhe gehalten wird, eine Zunahme der Spannung zwischen den Lampenelektroden. Da nun bei Stromschwankungen die Ablenkung des Bogens bald größer, bald kleiner ist, werden die ohnehin entstehenden Spannungsschwankungen und mit ihnen die Energie der Schwingungen verstärkt. Die Elektromagnete, welche die Ablenkung des Lichtbogens bewirken, können von dem Speisestrom der Lampe erregt werden. Eine solche Anordnung zeigt Fig. 84.

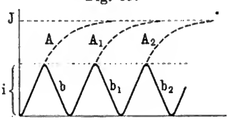
Nach Duddel genügt der 10000. Teil des Hauptstromes, um bei einer Frequenz von 8000 Wechseln in der Sekunde akustische Wirkungen hervorzurufen. Diese außerordentlich große Empfindlichkeit des elektrischen Licht-

[1]) Ruhmer, E. T. Z. 1907, S. 426. — [2]) E. T. Z. 1906, S. 1040 bis 1044.

bogens hat Professor Herm. Th. Simon dazu benutzt, den Lichtbogen als Empfangsapparat für Fernsprechströme zu benutzen [1]).

Etwas ausführlicher mag noch auf die von Dr. G. Benischke gegebene Erklärung [2]) der Vorgänge im Lichtbogen eingegangen werden. Benischke nimmt an, daß der Lichtbogen für eine gewisse, wenn auch außerordentlich kurze Zeit unterbrochen oder der Unterbrechung so nahe gebracht wird, daß er im nächsten Augenblick erlöschen müßte, d. h. der Lichtbogen wird bis zur Grenze seines stabilen Gleichgewichts geschwächt, dann erholt er sich, um bald darauf wieder in voller Höhe zu leuchten. Die Ursache für die Schwächung liegt in dem den Flammenbogen umgebenden Magnetfelde oder in der Abkühlung der Elektroden. Wird in dem nach Fig. 84 geschalteten Lampenkreise der Strom durch Berührung der Elektroden B geschlossen, so entsteht ein Lichtbogen. Die Stromstärke steigt jedoch nicht plötzlich zu ihrer vollen Stärke an, sondern infolge der in der Leitung und der Lampe liegenden Selbstinduktion L' nur langsam, etwa nach der in Fig. 85 gezeichneten Kurve A. Mit dem Anwachsen des Stromes wird aber auch das auf den Flammenbogen wirkende Magnetfeld kräftiger. Dieses möge nun bei einer durch die Ordinate i bezeichneten Stromstärke so stark sein, daß es in Verbindung mit den abkühlenden Einflüssen den Lichtbogen nahezu unterdrückt. Infolgedessen fällt der Strom wieder ab, jedoch nicht plötzlich, sondern unter der Wirkung der Selbstinduktion L' allmählich, etwa wie die Kurve b es darstellt. Da die Gasstrecke zwischen den Lampenelektroden jedoch ihre Leitfähigkeit nicht sofort ganz verliert und auf die Elektroden dauernd eine hohe Betriebsspannung wirkt, setzt der Lichtbogen alsbald wieder ein. Der Strom steigt nach der Kurve A_1 an, bis mit der wachsenden Stromstärke das magnetische Gebläse kräftig genug geworden ist, den Lichtbogen zu schwächen und erneutes Sinken des Stromes zu veranlassen. So kommt ein Wellenstrom zustande, dessen Verlauf durch die in Fig. 85 ausgezogene Kurve b, b_1, b_2 gegeben ist [3]).

Fig. 85.



Hiernach muß jedes Mittel, welches den Lichtbogen zu unterdrücken vermag, und dessen Wirkung mit der Stromstärke zunimmt, imstande sein, jene Wellenströme zu erzeugen. Als ein solches Mittel ist die Hintereinanderschaltung einer größeren Anzahl von Lichtbogen zu betrachten, denn mit dem plötzlichen Ansteigen des Stromes steigt im ersten Augenblick die Potentialdifferenz in jedem Lichtbogen, so daß durch die übrigen einem jeden Spannung entzogen wird. Bevor daher ein stationärer Zustand eintreten kann, gelangen die Lampen bis nahe an die Grenze des Verlöschens, um sofort danach gleichsam einen neuen Versuch zu machen, in Brand zu kommen.

[1]) E. T. Z. 1901, S. 510 ff.; Phys. Zeitschr., 2. Jahrg. 1901, S. 253 bis 258. Zur Theorie der Vorgänge im Lichtbogen vgl. ferner Simon, Phys. Zeitschr., 6. Jahrg. 1905, S. 297 ff. und 7. Jahrg. 1906, S. 433; Kaufmann, Ann. d. Phys. 2, 158, (1900); C. Heinke, Verhandl. d. Ver. z. Beförderung d. Gewerbefleißes 1904, Heft 10, S. 403 ff.; Dr. Mosler, E. T. Z. 1907, S. 142; Hahnemann, E. T. Z 1907, S. 353; Dr. Heinr. Freih. Rausch v. Frankenberg, E. T. Z. 1907, S. 559. — [2]) E. T. Z. 1906, S. 1212. — [3]) Vgl. hierzu auch E. Ruhmer, E. T. Z. 1907, S. 69.

Zweiter Teil.

Betriebseinrichtungen für elektrische Wellentelegraphie.

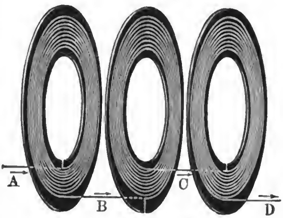
XX. Allgemeines über den Bau der Apparate.

Der Induktionsapparat. Die Energie zur Speisung der Schwingungskreise wird durch Induktionsapparate, auch Induktoren genannt, erzeugt. Ein solcher Apparat besteht im wesentlichen aus zwei übereinander gewickelten Drahtspulen mit einem Eisenkern. Wird in der inneren, der primären Spule, ein Strom geschlossen oder geöffnet, so entsteht in der äußeren, der sekundären, infolge der gegenseitigen Induktion jedesmal eine EMK und zwar entweder dem primären Strom entgegengesetzt oder ihm gleichgerichtet. Die Größe dieser EMK wächst mit der Stärke des vom primären Strom erregten Magnetfeldes und der Anzahl der Umwindungen der sekundären Spule. Von Bedeutung für ihre Höhe ist ferner die Geschwindigkeit, mit der sich das Anwachsen des primären Magnetfeldes von Null zu seinem konstanten Wert und das Abfallen von diesem Höchstwert zu Null vollzieht. Die zeitliche Bewegung des Magnetfeldes erfolgt beim Schließen des primären Stromes langsamer als beim Öffnen, denn die Selbstinduktion der Spule verzögert das Ansteigen des Stromes. Beim Öffnen tritt die Selbstinduktion in gleicher Richtung mit dem unterbrochenen Strome auf. Da, wo dessen Leitweg gewaltsam getrennt wird, gleicht sich die Spannung der Selbstinduktion in einem Lichtbogen oder Funken aus, durch welchen der Stromweg noch kurze Zeit geschlossen gehalten wird. Trotzdem gelingt es aber, den Strom schneller zu unterbrechen, als er beim Schließen ansteigt, besonders wenn die Funken dadurch verkleinert oder ganz beseitigt werden, daß man einen Kondensator zur Unterbrechungsstelle parallel schaltet. Die sekundäre Spannung des Induktoriums ist daher beim Öffnen des primären Stromes wesentlich größer als beim Schließen. Der Unterschied zwischen der Öffnungsspannung und der Schließungsspannung ist so bedeutend, daß für manche Zwecke nur die erstere benutzt wird, während die andere ganz außer Betracht bleibt.

Um recht hohe Spannungen zu erzielen, wird man dem Induktorium eine mit ausreichendem Eisenkern versehene primäre Spule mit wenigen dicken Umwindungen geben und einen sehr kräftigen Strom hindurchsenden; die sekundäre Spule wird sehr viele Umwindungen erhalten. In dieser Anordnung werden Induktoren für mehrere Hunderttausend Volt sekundärer Span-

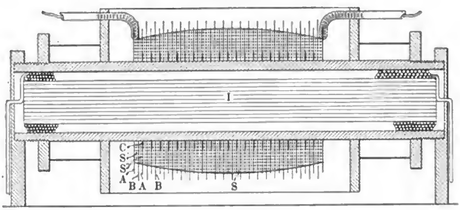
nung gebaut, welche meterlange Funken erzeugen. Für die drahtlose Telegraphie genügen jedoch niedrigere Spannungen, so daß eine verhältnismäßig geringe Anzahl sekundärer Windungen ausreicht. Man stellt aber diese Windungen aus ziemlich dickem Drahte her, um dem Apparat stärkere Ströme entnehmen zu können.

Fig. 86 a.



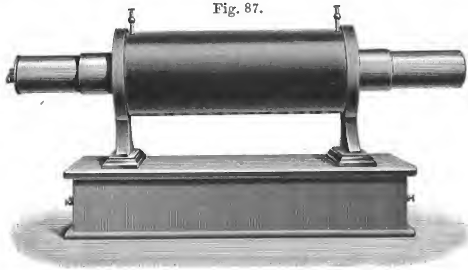
Die hohen Spannungen erfordern eine sehr widerstandsfähige Isolation der Drähte. Für diesen Zweck wird ihre Umspinnung mit Harz oder Wachs getränkt, oder es wird die ganze Spule in Öl getaucht. Da nun der Spannungsunterschied zwischen den hintereinander gewickelten Windungen der sekundären Spule wächst, je weiter die Windungen auseinander liegen, z. B. die Spannung zwischen der 1. und 1000. Windung etwa zehnmal größer ist als

Fig. 86 b.



zwischen der 1. und 100. oder zwischen der 900. und der 1000. Windung, so wird die sekundäre Spule zum Schutze der Isolierhülle häufig in der Weise

Fig. 87.



unterteilt, daß eine große Reihe kurzer, scheibenförmig gewickelter Spulen (Fig. 86 a) von wenigen Windungen auf die primäre aufgeschoben und

hintereinander verbunden werden. Die Windungen einer solchen Teilspule haben dann verhältnismäßig geringen Spannungsunterschied gegeneinander. Zwischen die Teilspulen werden Scheidewände aus gut isolierendem Stoff eingelegt, welche von den höheren Spannungen zwischen den weiter auseinanderliegenden Windungen nicht durchschlagen werden können. Eine solche Anordnung ist in Fig. 86 b (a. v. S.) dargestellt. *I* ist der Eisenkern, auf den die Primärwickelung von dickem Draht in drei Lagen aufgebracht ist. Die sekundäre Wickelung besteht aus vielen kleinen Spulen *S*, welche durch die Platten *A*, *B* getrennt sind. Die Figg. 87 und 88 zeigen die äußere Ansicht von Funkeninduktoren, wie sie für die drahtlose Telegraphie hergestellt werden. Der in Fig. 88 dargestellte ist in einem Holzkasten untergebracht und so eingerichtet, daß er an der Wand befestigt werden kann; der primäre Strom wird an den oben sichtbaren Klemmen zugeführt, die hohe Spannung von den Klemmen auf dem Mantel abgenommen.

Fig. 88.



Um das Induktorium in Betrieb zu setzen, muß der primäre Strom in stetem Wechsel geschlossen und geöffnet werden. Die hierdurch in der sekundären Wickelung entstehenden Wechselströme sind nicht genau sinusförmig und besitzen verhältnismäßig geringe Frequenz. Es sind langsame Schwingungen, die immer die Neigung haben, einen Lichtbogen zu erzeugen. Hierdurch wird aber ein dauernder Leitweg zwischen den Elektroden der Funkenstrecke geschaffen, so daß eine Aufladung des an die Funkenstrecke angeschlossenen Schwingungskreises nicht stattfinden kann. Das ist ein Übelstand, welcher die Benutzung eines solchen Induktoriums in Frage stellen könnte. Es ist daher wichtig, dafür zu sorgen, daß die langsamen Schwingungen beim Einsetzen des Funkens genügend abgeschwächt werden. Diesem Zweck können Widerstände und Drosselspulen dienen, die in den primären Stromkreis des Induktoriums eingeschaltet werden. Hierdurch wird erreicht, daß die Nachlieferung der Energie aus dem primären in den sekundären Kreis ein gewisses Maß nicht überschreiten kann.

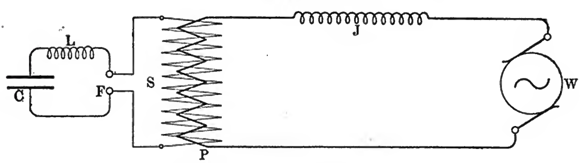
Resonanzinduktoren. In neuerer Zeit wird der primären Wickelung des Induktoriums statt des unterbrochenen Gleichstromes Wechselstrom unmittelbar zugeführt. Das Induktorium übernimmt in dieser Anordnung die Rolle eines Transformators. Bei der Konstruktion solcher Induktoren ist das Auftreten von Resonanz begünstigt und dazu benutzt worden, mit geringerem Aufwand an primärer Energie höhere sekundäre Spannungen zu erzielen und ferner die Entstehung eines Lichtbogens zu verhindern. Derartige Induktoren sind als Resonanzinduktoren[1]) bezeichnet worden. So lange noch kein Funke zwischen den Elektroden der Funkenstrecke besteht, ist die sekundäre Wickelung des Induktors mit dem Kondensatorkreis verbunden.

---

[1]) Näheres G. Seibt, E. T. Z. 1904, S. 276; G. Benischke, ebenda 1907, S. 25; C. Breitfeld, ebenda, S. 627.

Sie bildet, wie Fig. 89 zeigt, mit diesem einen Schwingungskreis, der eine ganz bestimmte Eigenperiode besitzt. Die Selbstinduktion der Induktorwindung *S* wird nun so gewählt, daß die Eigenschwingung jenes Kreises mit der Periodenzahl des primär zugeführten Wechselstromes übereinstimmt. Der Senderkreis befindet sich dann in Resonanz mit dem primären Wechselstrom. Wir haben bei der Betrachtung der Aufnahme von Schwingungen durch geschlossene Systeme (S. 48) erfahren, daß die in einem sekundären System zur Geltung kommenden periodischen Wirkungen eines primären Erregers im einzelnen verhältnismäßig schwach sein können, daß sich bei Resonanzabstimmung aber die aufeinanderfolgenden Wirkungen addieren, so daß die Schwingungen nach und nach immer kräftiger werden. Sie wachsen ganz allmählich zu einem Höchstwert an. Dieses Anwachsen erfolgt um so langsamer, je geringer im einzelnen die Einwirkung der primären Spule auf die sekundäre, je schwächer also der primäre Strom im Induktor ist. Schalten wir in den Primärkreis zwischen die Wechselstrommaschine *W* und die primäre Induktorspule *P* eine Selbstinduktionsrolle *J* ein, so ist der Energiezuwachs, der mit jeder Periode den in *S* erregten Schwingungen erteilt wird,

Fig. 89.



um so geringer, je größer die Rollegewählt ist. Dann dauert es auch um so länger, bis die sekundäre Spannung des Induktors so hoch ansteigt, daß bei *F* ein Funke überspringt. Will man Funken in schneller Folge haben, so muß man dem Induktor mehr Energie zuführen, als wenn man mit einer geringeren Anzahl von Funken in der Sekunde auskommen kann. Da nun die Empfangsapparate noch gute Telegraphierzeichen liefern, wenn auch eine verhältnismäßig geringe Anzahl von Wellenzügen in der Sekunde ankommt, genügt es, die Funken im Erregerkreise des gebenden Amtes in größeren Zeitabständen entstehen zu lassen, den Induktor also mit geringer Energie zu speisen. Resonanzinduktoren arbeiten daher mit besserem Wirkungsgrad als andere. Sie bieten jedoch noch einen weiteren Vorteil.

Sobald nämlich der Funke im Sekundärkreise des Induktors bei *F* einsetzt, wird die Resonanz gestört, denn durch den Funken werden die Elektroden der Funkenstrecke kurz geschlossen, so daß der Schwingungskreis *C*—*L* vom Induktor abgeschaltet ist. Hierdurch wird die Eigenschwingungszahl des sekundären Kreises plötzlich stark verstimmt. Die Spannung des Induktors, welche ihre Höhe einer Resonanzwirkung verdankte, fällt infolgedessen plötzlich auf einen sehr kleinen Wert, der nicht imstande ist, bei *F* einen Lichtbogen zu erzeugen oder zu unterhalten. Durch die Verwendung von Resonanzinduktoren wird daher auch die Gefahr eines Lichtbogens in der Funkenstrecke beseitigt.

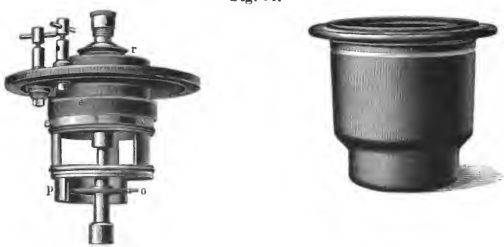
Die Resonanzinduktoren können übrigens mit unterbrochenem Gleichstrom ebensogut wie mit Wechselstrom gespeist werden. Es sind für diesen Zweck allerdings nicht alle Stromunterbrecher geeignet, weil die Zahl der sekundlichen Unterbrechungen sich zur Erzielung der Resonanz den übrigen Verhältnissen des Stromkreises anpassen muß.

Der Hammerunterbrecher. Für geringe Leistungen eignet sich der bekannte Wagnersche Hammer, der kurz als Hammerunterbrecher bezeichnet wird. Der Eisenkern des Induktoriums mit der Primärwickelung dient als Elektromagnet zur Anziehung des schwingenden Ankers, welcher einen Teil der Strombahn ausmacht und diese unterbricht, sobald er angezogen wird. Infolge der Unterbrechung des Stromes läßt der Magnetismus nach, der Anker fällt ab und schließt den Strom wieder.

Ein Übelstand der Hammerunterbrecher ist das Kleben des Ankers und das Verbrennen der Kontakte.

Der Quecksilberstrahlunterbrecher. Frei von den eben genannten Mängeln und daher zuverlässiger ist der Queksilberstrahlunterbrecher. Seine Einrichtung beruht auf folgender Grundlage. Aus einer feinen Öffnung eines Metallrohres wird ein Quecksilberstrahl gegen ein Metallstück gespritzt.

Fig. 90.



Wird nun der eine Pol eines Stromkreises an das Rohr, der andere an das gegenüberliegende Metallstück gelegt, so wird der Strom durch den Quecksilberstrahl geschlossen. Nun dreht man entweder das Rohr im Kreise so, daß der Quecksilberstrahl in einer horizontalen Ebene umläuft und das Metallstück bei jeder Umdrehung einmal trifft, oder man läßt das Metallstück um die Rohröffnung kreisen, so daß es bei jeder Umdrehung den Quecksilberstrahl einmal schneidet. Beide Einrichtungen haben denselben Erfolg, daß nämlich der Strom in regelmäßiger Folge abwechselnd geschlossen und unterbrochen wird. Die Häufigkeit der Unterbrechungen kann dadurch gesteigert werden, daß man mehrere Metallstücke, die untereinander leitend verbunden sind, mit genügend großen Zwischenräumen rings um die Ausflußöffnung anordnet und daß man die Umdrehungsgeschwindigkeit dieser Metallstücke oder des Quecksilberstrahles beschleunigt. Fig. 90 zeigt einen Quecksilberunterbrecher. Rechts ist ein gußeisernes Gefäß gezeichnet, dessen Boden mit

Quecksilber bedeckt ist. In dieses Gefäß wird die links dargestellte Maschinerie hineingesetzt. Dann taucht der mittlere Schaft in das Quecksilber ein. An dem oben hervorragenden Ende des Schaftes ist eine Riemenscheibe *r* angebracht, mittels deren er durch einen Motor gedreht werden kann. Der Schaft ist im unteren Ende hohl und zu einer kleinen Turbine ausgebildet. Diese hebt bei schneller Umdrehung das Quecksilber in die Höhe, bis es infolge der Zentrifugalkraft aus einer, in der Zeichnung über dem unteren Ende bei *o* sichtbaren seitlich gerichteten Öffnung ausgespritzt wird. Mit dem Schaft dreht sich der so erzeugte Quecksilberstrahl dauernd herum. In gleicher Höhe mit der Öffnung ist eine Metallplatte *p* von der Form eines halben Zylindermantels sichtbar. Gegen die innere Fläche dieses Mantels wird das Quecksilber während der halben Dauer einer Umdrehung gespritzt. Der Metallmantel und der Turbinenschaft sind mit den Polen des primären Stromkreises verbunden. Um die Isolation des Quecksilbers gegen die übrigen Metallteile zu sichern, wird es mit absolutem Alkohol bedeckt; die Innenseite des gußeisernen Gefäßes ist mit einem in Alkohol nicht löslichen isolierenden Lack gestrichen. Zur Verwendung auf Schiffen sind die Turbinenunterbrecher mit dem zugehörigen Motor zu einem Apparatsatze vereinigt und mit einer kardanischen Aufhängevorrichtung versehen, wie es Fig. 91 und 92 darstellen.

Fig. 91.

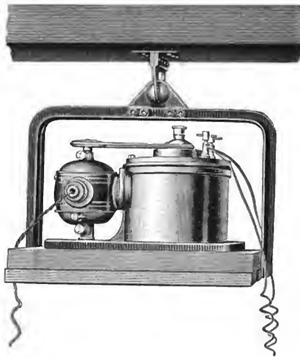


Fig. 92.

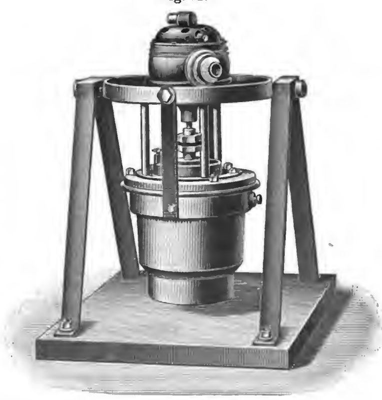
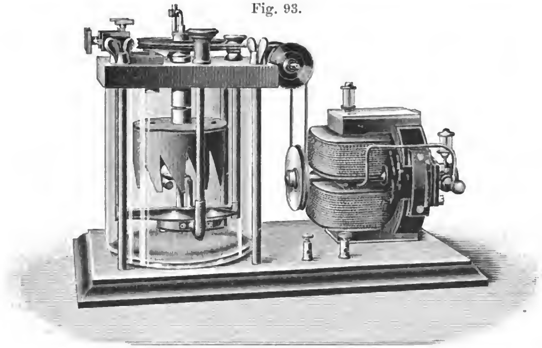


Fig. 93 zeigt einen von M. Levy konstruierten Quecksilberstrahlunterbrecher, bei welchem die Zahl der Unterbrechungen durch die Verwendung eines mit zahlreichen Ausschnitten versehenen Metallringes gesteigert worden ist.

Die Quecksilberunterbrecher bedürfen recht sorgfältiger Wartung, denn das Quecksilber wird so fein zerstäubt, daß es sich innig mit dem Alkohol vermischt und dadurch an Leitfähigkeit verliert. Es muß deshalb häufig gereinigt werden. Diese Unterbrecher besitzen aber den großen Vorzug, daß

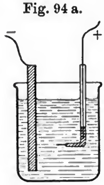
Fig. 93.



sie auch zum Betriebe von Resonanzinduktoren verwendbar sind, denn ihre Unterbrechungszahl kann durch die Regelung der Motorgeschwindigkeit auf die Höhe gebracht werden, welche zur Resonanz mit der sekundären Wickelung erforderlich ist.

Der Wehnelt-Unterbrecher. Von Bedeutung ist ferner der elektrolytische Unterbrecher von Wehnelt. Seine Wirkungsweise beruht auf folgendem Vorgang. Wird ein elektrischer Strom mit Hilfe von zwei Elektroden, eines Platinstiftes und einer Bleiplatte, durch verdünnte Schwefelsäure geschickt, so kann man beobachten, daß sich der Platindraht erhitzt, und zwar bei ausreichender Stromstärke so stark, daß er glühend wird und rings um ihn das Wasser verdampft. Durch die ihn umhüllende Dampfschicht wird der Draht jedoch für kurze Zeit von der leitenden Flüssigkeit abgeschnitten. Infolgedessen wird der Strom unterbrochen [1]), die Erhitzung hört auf und der Dampf verdichtet sich oder steigt nach oben. Sobald der Draht dann wieder in Berührung mit der Flüssigkeit kommt, wiederholt sich der Vorgang. Eine sehr einfache Form des Wehnelt-Unterbrechers zeigt Fig. 94 a; eine verbesserte Form mit Wasserkühlung ist in Fig. 94 b abgebildet. Der positive Strom tritt an einer zum Teil in Glas eingeschmolzenen Platinelektrode

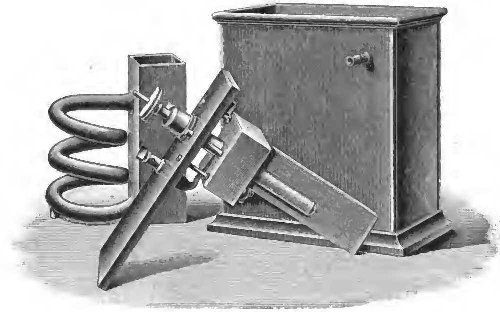
Fig. 94 a.



[1]) Vgl. C. Heinke, Wied. Ann. d. Phys. u. Chem. 1, 329 (1900). Heinke stimmt der Auffassung, daß der Strom völlig unterbrochen wird, nicht zu; nach seiner Ansicht tritt zwar eine schnelle Stromänderung, jedoch keine Unterbrechung ein.

ein und verläßt die Zelle an einer Bleiplatte. Der Wehnelt-Unterbrecher liefert mehrere hundert Unterbrechungen in der Sekunde. Er wird aber nur selten verwendet, weil er große Energiemengen verzehrt und die drahtlose

Fig. 94 b.



Telegraphie so hohe Wechselzahlen, wie er liefert, gar nicht gebraucht. Hauptsächlich ist er aus dem Grunde unbequem, weil seine Unterbrechungszahl nicht in leicht meßbarer Weise zu verändern, er selbst also für Resonanzinduktoren nicht zu gebrauchen ist.

Die Morsetaste dient dazu, beim Senden von Zeichen den Primärstrom im Takte des Morsealphabets zu schließen und zu öffnen. Die Anordnung entspricht ganz derjenigen der gewöhnlichen Telegraphiertasten. Weil der Apparat jedoch stärkere Ströme auszuhalten hat, sind alle Teile größer und schwerer gebaut. Als besonderes Unterscheidungsmerkmal besitzt die für die Funkentelegraphie bestimmte Taste eine Vorrichtung zum Auslöschen der beim Öffnen des Stromes entstehenden Funken. Die Ansicht einer solchen Taste zeigt Fig. 95. Die elektrische Einrichtung ist in Fig. 96 schematisch dargestellt. Wird die Taste gedrückt, so fließt der

Fig. 95.

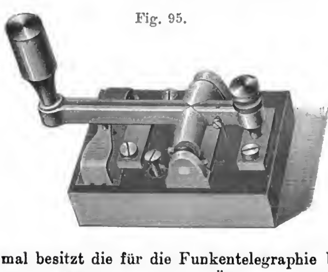
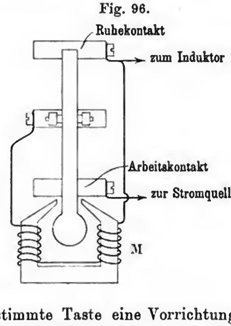
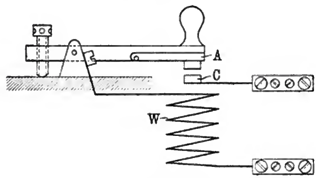


Fig. 96.



Strom vom Arbeitskontakte über die Mittelschiene, den Elektromagneten *M* und die Ruheschiene zum Induktor. Der Elektromagnet, dessen hörnerförmige Polschuhe bis dicht an den Arbeitskontakt reichen, bleibt erregt, so lange der Tastenhebel niedergedrückt ist. Entsteht beim Loslassen der Taste zwischen dem Amboß und dem Hebel ein Funke, so bleibt der Strom durch den Funken geschlossen. Da auch der Magnet *M* erregt bleibt, so lenkt er die durch den Funken gebildete Strombahn kräftig ab. Der Funke wird auf diese Weise ausgelöscht, wenn er eben entstehen will.

Fig. 97.



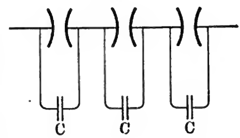
Eine andere Anordnung für denselben Zweck hat Prof. Braun angegeben; sie wird durch Fig. 97 erläutert. *W* ist die Wickelung eines Elektromagneten. So lange dieser vom Strome erregt wird, drückt er den aus Eisen angefertigten Kontakt *A* auf den mit der Stromquelle verbundenen Amboß *C* nieder und hält ihn in dieser Lage fest. Der Tastenhebel kann daher nur dann nach oben bewegt werden, wenn der Elektromagnet nicht erregt ist, d. h. bei der Verwendung von Gleichstrom, wenn dieser im Unterbrecher gerade getrennt ist, oder bei der Verwendung von Wechselstrom, wenn dieser durch den Wert Null hindurchgeht. In beiden Fällen ist es ausgeschlossen, daß ein Lichtbogen sich bildet.

Die Funkenstrecken. Zur Herstellung der Elektroden für Funkenstrecken hat sich Zink schon seit langer Zeit am besten bewährt. Die Form der Elektroden hat jedoch verschiedene Wandlungen durchgemacht. Spitze Elektroden begünstigen das Überspringen der Funken mehr als flache, weil die Elektrizität aus Spitzen leichter ausströmt. Um die auf den Schwingungskreis wirkende Spannung zu erhöhen, müßte man daher spitze Elektroden viel weiter voneinander entfernen, als flache oder abgerundete. Flache Elektroden begünstigten dagegen die Entstehung eines Lichtbogens; sie haben aber den Vorteil, daß bei derselben Spannung die Wegstrecke und damit der Funkenwiderstand geringer ist als bei spitzen. Da bei der Verwendung von Resonanzinduktoren die Verhütung des Lichtbogens keine Schwierigkeiten mehr bietet, sind jetzt fast ausschließlich flache, teller-, pilz- oder ringförmige Elektroden im Gebrauch.

Während der Funke überspringt, werden die Elektroden und ihre Umgebung stark erhitzt. Der Raum zwischen ihnen ist mit heißen Metalldämpfen und glühenden, elektrisch geladenen Metallteilchen angefüllt. Der elektrische Widerstand dieser Luftstrecke richtet sich nach ihrer Länge, also nach dem Abstande der beiden Elektroden, aber auch nach der Stärke des Stromes, welcher im Funken übergeht. Er ist bei starken Strömen geringer als bei schwachen. Arbeitet man daher mit sehr starken Strömen, also mit Schwingungskreisen von großer Kapazität, so kann man die Elektroden zur Erzielung von hohen Spannungen bis auf mehrere Zentimeter voneinander entfernen, ohne daß der Widerstand der Funkenstrecke allzu sehr ansteigt und

eine gefährliche Dämpfung verursacht. Bei geringeren Stromstärken ist die Länge des Funkens wesentlich mehr beschränkt. Um in solchen Fällen die Spannung zu erhöhen, hat es sich als zweckmäßig erwiesen, die Funkenstrecke in mehrere einzelne, hintereinander geschaltete zu unterteilen, wie es die Anordnung in Fig. 98 zeigt. Die Gesellschaft für drahtlose Telegraphie in Berlin versieht diese Funkenstrecke mit Spannungsteilern. Das sind die kleinen Kondensatoren C, die sie zu den einzelnen Funkenstrecken parallel schaltet. Es soll dadurch eine gleichmäßige Verteilung der Spannung über die ganze Funkenbahn und ein gleichzeitiges Einsetzen der Teilfunken herbeigeführt werden. Um das Ohr gegen das heftige, oft betäubende Geräusch, welches beim Überspringen der Funken entsteht, zu schützen, wird die Funkenstrecke häufig in einen Filzzylinder eingeschlossen. In einem derartig abgeschlossenen Raume erhitzt sich jedoch die Luft sehr schnell, und es sammeln sich elektrische Ladungen in ihr an, wodurch das präzise Einsetzen des Funkens benachteiligt und die Bildung eines Lichtbogens begünstigt wird. Es muß daher für die dauernde Zufuhr kühler, von elektrischen Ladungen freier Luft gesorgt werden. Dies kann durch Ventilatoren geschehen. Für den gleichen Zweck ist auch folgendes Verfahren angewendet worden: Man hat die Elektroden hohl gebaut und mit kleinen Öffnungen versehen; dann hat man Preßluft durch die Elektroden hindurchgetrieben, welche bei ihrem Austritt die Umgebung der Öffnungen abkühlt und gleichzeitig die elektrischen Ladungen zwischen den Elektroden vertreibt.

Fig. 98.

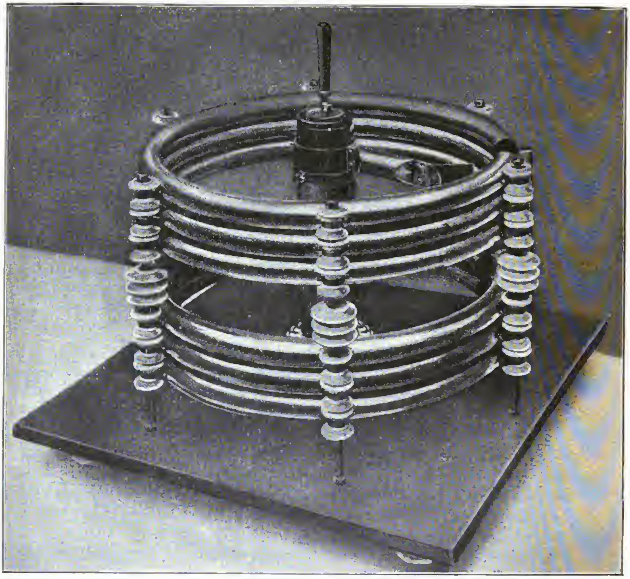


Der Erregerkreis. Die für die Erregung der elektromagnetischen Schwingungen erforderlichen Kondensatoren müssen eine passende Kapazität besitzen und imstande sein, die hohen Spannungen des Induktoriums auszuhalten. Nach den bisherigen Erfahrungen entsprechen Glaskondensatoren diesen Anforderungen in befriedigender Weise. Diese sind fast allgemein eingeführt, meist in der Form von Leydener Flaschen, seltener als Franklinsche Tafeln. Eine Leydener Flasche aus 3 mm starkem Glase von 113 mm lichter Weite mit einer Stanniolbelegung von 250 mm Höhe besitzt eine Kapazität von etwa 0,003 Mf.

Die für den Erregerkreis erforderliche Selbstinduktion wird durch Drahtspulen ohne Eisenkern geliefert, deren Windungen je nach Bedarf zum Teil abgeschaltet werden können. Wir haben gesehen, von welcher Bedeutung es ist, den Widerstand des Schwingungskreises so gering wie möglich zu machen. Man wird deshalb für die Selbstinduktionsspulen recht dicken Draht wählen. Bei den schnellen Schwingungen verteilt sich jedoch der Strom nicht gleichmäßig über den Querschnitt des Leiters. Denken wir uns den elektrischen Strom — in Anlehnung an bekannte Darstellungsbeispiele —, bestehend aus vielen nebeneinanderliegenden feinen Stromfäden, so wirken die benachbarten Stromfäden bei jedem Wechsel der Stromrichtung induzierend aufeinander. In jedem Stromfaden wird also ein Wechselstrom induziert, der den ursprünglichen Strom schwächt. Diese Wirkung ist im Innern des Drahtquerschnittes

kräftiger als an der Außenseite, weil die inneren Stromfäden von allen Seiten von induzierenden Nachbarströmen umgeben sind, die außen verlaufenden jedoch nicht. Die innere Schicht des Leiters wird daher elektrisch fast gar nicht beansprucht; den Widerstand des Leiters bedingen nur die außen nahe an der Oberfläche liegenden Teile. Für große Stationen, die mit besonders kräftigen Strömen arbeiten, werden daher an Stelle von massiven Leitern Kupferrohre von beträchtlichem Durchmesser, z. B. 5 cm und mehr, in spiralförmigen Windungen als Selbstinduktionsspulen verwendet, ähnlich wie es Fig. 99 zeigt.

Fig. 99.



Die Luftleiter. Die Aufgabe der Luftleiter oder Antennen ist es, Wellen auszustrahlen oder zu empfangen. Marconi hat bei seinen ersten Versuchen beobachtet, daß die elektromagnetischen Schwingungen nur dann auf nennenswerte Entfernungen wirksam waren, wenn zu ihrer Aussendung und zum Empfang senkrecht in die Höhe geführte Drähte benutzt wurden.

Die vom Luftleiter ausgestrahlten Energiemengen sind um so größer, ihre Wirkung reicht daher um so weiter, je stärker die in dem Luftleiter fließenden Ströme sind. Die Stromstärke in einem schwingenden System aber wächst nach der Gleichung [32] mit der Kapazität des Systems. Hier-

nach ist es erwünscht, dem Luftleiter möglichst hohe Kapazität zu erteilen. Damit geraten wir jedoch in einen gewissen Widerstreit; denn je größer wir die Kapazität des Luftleiters machen wollen, um so mehr müssen wir uns der Form geschlossener Schwingungskreise nähern, also derjenigen Form, welche nur eine geringe Strahlungsfähigkeit besitzt. Um nun die Kapazität des Luftleiters zu erhöhen und gleichzeitig seine Strahlungsfähigkeit möglichst unvermindert zu erhalten, sind mancherlei Zusammenstellungen versucht worden. So sind an den oberen Enden des Luftdrahtes größere Metallmassen in Gestalt von Drähten, Drahtnetzen oder ähnlichen Gebilden angebracht worden, oder es ist eine größere Anzahl von parallel geführten oder strahlenförmig auseinandergehenden Luftdrähten zu einem System vereinigt worden.

Fig. 100.

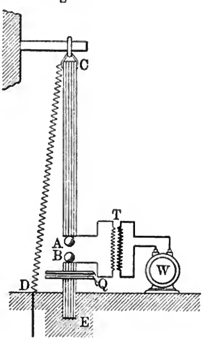
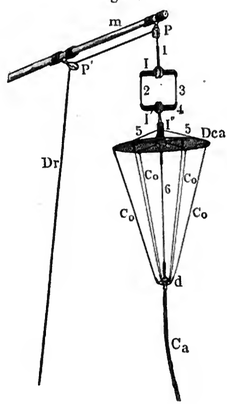


Fig. 101.

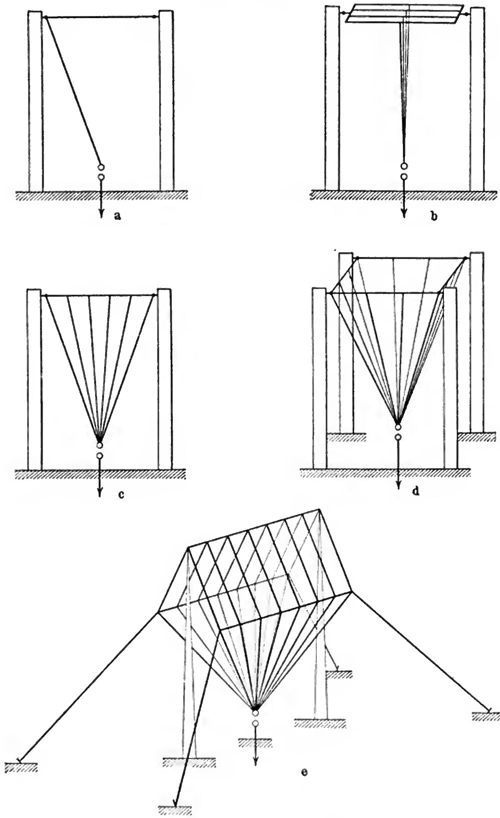


Wenn die Kapazität eines Sendergebildes 10 000 cm $= 0{,}011 \cdot 10^{-6}$ Farad beträgt, so berechnet sich die beim Einsetzen der Schwingungen im ersten Augenblick auftretende Maximalstromstärke, sofern eine Ladespannung von 50 000 Volt und eine Periodenzahl von 1 000 000 angenommen wird, nach der Gleichung [32] auf $50\,000 \cdot 0{,}011 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 3{,}14 \cdot 10^{6}$, d. i. auf 3454 Amp. Hiernach beträgt die im ersten Augenblick vorhandene sekundliche Energie $J.E = 3454 \times 50\,000$ gleich 172 700 000 Watt oder rund 227 000 Pferdestärken. Diese gewaltige Energiemenge ist jedoch nur einen sehr kurzen Augenblick hindurch wirksam. Schon die zweite Schwingung ist infolge der Strahlung und der Wärmeverluste viel schwächer und nehmen wir — nach einem früheren Beispiel — im ganzen 10 Schwingungen für einen Wellenzug an, so ist der ganze Vorgang in $\frac{10}{1\,000\,000}$ Sekunden beendet.

Zur Hochführung der Drähte werden Gebäudeteile oder besonders für diesen Zweck errichtete Masten und Türme verwendet. Fig. 100 zeigt eine von Slaby, Fig. 101 eine von Ducretet angegebene Form des Luftleiters.

Stehen zwei oder mehrere Masten zur Verfügung, so lassen sich verschiedene Anordnungen treffen, von denen einige in Fig. 102 dargestellt sind. Die

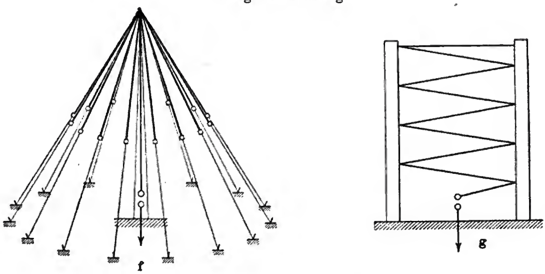
Fig. 102 a bis e.



T-Form nach Fig. 102 b wird besonders auf Schiffen gebraucht, wo sie durch die Lage der als Stützpunkte dienenden Schiffsmasten gegeben ist. Fig. 102 e gibt das Schema einer dachförmig, Fig. 102 f dasjenige einer schirmförmig

gebauten Antenne. Die Schirmantenne wird auch als Doppelkegel angeordnet. Eine Leitungsführung nach Fig. 102 g ist jedoch zu verwerfen, weil die

Fig. 102 f und g.



Schwingungen in diesem Falle nicht dem Lauf der Drähte folgen, sondern die kurzen Zwischenräume von Draht zu Draht überspringen würden.

Fig. 103.

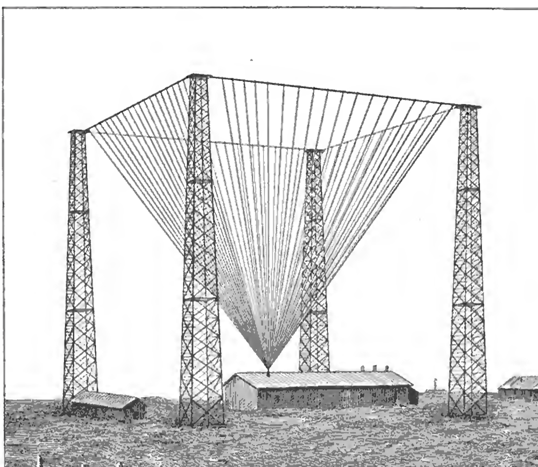


Fig. 103 gibt ein Bild der Antenne, die Marconi für den transatlantischen Verkehr in Poldhu und bei Cape Cod hat errichten lassen. Als Leitungsmaterial dienen ganz dünne, aus mehreren Bronzedrähten gedrehte Seile,

welche sich ihrer Biegsamkeit wegen sehr gut zur Herstellung der Antennen eignen. Die Isolation der Luftleiter muß sehr sorgfältig ausgeführt werden, damit nicht einzelne Teile oder die ganzen Antennen mit Gebäudeteilen oder mit den Masten Erdschluß erhalten und dadurch außer Wirksamkeit gesetzt werden. Zur Isolierung wird Hartgummi, Porzellan und Glas benutzt; letzteres in armdicken und meterlangen Stäben. Die Masten werden zumeist aus Holz errichtet. Eiserne Masten haben den doppelten Nachteil, daß die Isolation größere Sorgfalt erfordert und daß die Eisenteile leicht die vom Luftleiter ausgestrahlten Wellen auffangen und zur Erde ablenken. Man wird daher Holz vorziehen, wenn nicht so hohe Masten notwendig sind, daß bei der Verwendung von Holz die Standfestigkeit gefährdet oder die Kosten zu bedeutend würden.

Der Luftdraht bildet immer nur die eine Hälfte des als Sender benutzten offenen Oszillators. Die andere Hälfte wird durch die Erde ersetzt. Wo eine gutleitende Erdverbindung nicht zu erreichen ist, werden statt ihrer Gegengewichte angeschlossen. Als solche dienen zumeist große Drahtgeflechte, die dicht über dem Erdboden ausgebreitet werden.

Für bewegliche Stationen, z. B. für die fahrenden Stationen des Landheeres, wird als Antenne ein einzelner Draht durch einen Drachen oder einen Luftballon emporgehoben; als Gegengewicht wird ein Drahtgeflecht von der Art, wie es z. B. für Drahtzäune zur Verwendung gelangt, in einer Länge von etwa 10 m ausgebreitet.

Verlängerungsspule; Erdkondensator. Durch die Länge des Luftdrahtes wird im wesentlichen, wie wir früher gesehen haben, die Länge der Wellen bestimmt. Will man z. B. mit 400 m langen Wellen arbeiten, so müßte nach der Gleichung [53] der Luftdraht 100 m lang gemacht werden. Diese Bedingung läßt sich jedoch nicht immer erfüllen. Häufig wird man auf eine gewisse Höchstlänge des Luftleiters angewiesen sein, wenn man nicht unverhältnismäßig hohe Kosten für besondere Gerüste oder Türme aufwenden will. Um trotzdem die gewünschte Wellenlänge zu erhalten, werden Kapazitäten und Selbstinduktionsspulen mit dem Luftleiter in Verbindung gebracht, welche eine Veränderung der Wellenlänge bewirken. Durch eine Vermehrung der Selbstinduktion wird die Wellenlänge vergrößert. Die Anschaltung einer Selbstinduktionsrolle hat also denselben Erfolg, als wenn die Antenne verlängert würde. Solche Spulen werden daher auch als Verlängerungsspulen bezeichnet. Soll aus irgend einem Grunde die Wellenlänge eines Luftleiters verkürzt werden, so kann dies, wenn eine Verlängerungsspule vorhanden ist, durch deren Verkleinerung geschehen. Derselbe Zweck wird erreicht, wenn man eine Kapazität, den Erdkondensator, z. B. eine Leydener Flasche von passender Größe, in Reihe mit dem Luftleiter schaltet. Man kann solche Anordnung als zwei hintereinandergeschaltete Kondensatoren betrachten. Durch die Hintereinanderschaltung von Kondensatoren wird die Kapazität der gesamten Anordnung kleiner, als die der einzelnen Kondensatoren. Die Gesamtkapazität zweier parallel geschalteter Kapazitäten C_1 und C_2 ist gleich $C_1 + C_2$, die Gesamtkapazität zweier hintereinandergeschalteter Kapazitäten C_1 und C_2 ist gleich $\frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$. Dieser

Ausdruck leitet sich folgendermaßen ab. Die Gleichung [32] kann geschrieben werden

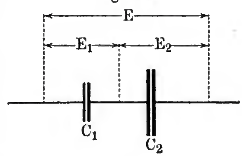
$$J = E \cdot C \cdot \omega \quad \ldots\ldots\ldots \quad [62]$$

worin E die an den Belegungen des Kondensators herrschende Spannungsdifferenz bedeutet und ω für das Produkt $2\pi\nu$ gesetzt ist. Hieraus folgt

$$E = \frac{J}{C\omega} \quad \ldots\ldots\ldots \quad [63]$$

Werden nun, wie in Fig. 104 dargestellt ist, zwei Kondensatoren hintereinandergeschaltet, so gilt für diese die Gleichung [63], wenn C die Gesamtkapazität der Anordnung und E die zwischen den äußeren Belegungen der beiden Kondensatoren bestehende Spannung bezeichnet. Diese Spannung E setzt sich zusammen aus den an den einzelnen Kondensatoren C_1 und C_2 herrschenden Spannungen E_1 und E_2; sie ist gleich $E_1 + E_2$. Nach Analogie der Gleichung [63] erhalten wir für diese Einzelspannungen die Werte

Fig. 104.



$E_1 = \frac{J}{C_1\omega}$ und $E_2 = \frac{J}{C_2\omega}$. Folglich kann für $E = E_1 + E_2$ geschrieben werden $\frac{J}{C\omega} = \frac{J}{C_1\omega} + \frac{J}{C_2\omega}$ und, da J für die ganze Anordnung infolge der Hintereinanderschaltung den gleichen Wert hat,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

oder

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad [64]$$

Hiernach ist C immer kleiner als C_1 oder C_2 und zwar überwiegt, wenn C_1 und C_2 verschieden groß sind, der Einfluß der kleineren dieser beiden Kapazitäten. Wir können so eine sehr große Kapazität fast unwirksam machen, wenn wir ihr eine sehr kleine vorschalten; denn setzen wir z. B. in der Gleichung [64] $C_1 = 100$, $C_2 = 0{,}1$, so ergibt sich für C der Wert 0,099.

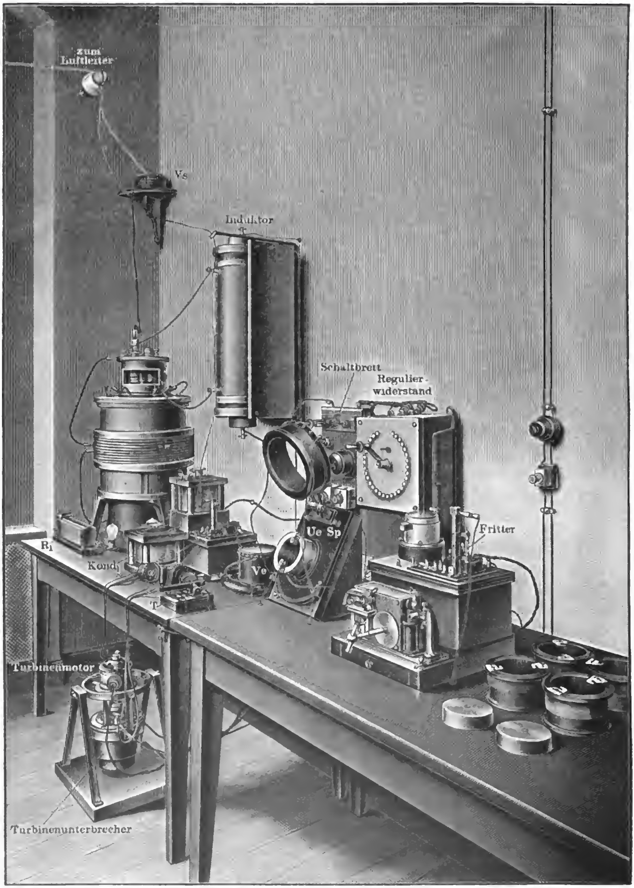
Ein Erdkondensator von veränderlicher Kapazität leistet sehr gute Dienste in den Empfangsschaltungen, wo er dazu benutzt wird, den Empfangsluftdraht auf die Länge der ankommenden Wellen abzustimmen.

XXI. Stationen mit geringer Reichweite.

In Fig. 105 (a. f. S.) ist die **Gesamtansicht einer Station für drahtlose Telegraphie** nach dem System „Telefunken" wiedergegeben [1]). Eine solche Station enthält die Vorrichtungen zur Erzeugung und Aussendung der elektromagnetischen Wellen, sowie zwei Satz Empfangsapparate mit Zubehör; der

[1]) Wir beschränken uns darauf, Stationseinrichtungen zu besprechen, wie sie von der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie, System „Telefunken", in Berlin hergestellt worden sind.

Fig. 105.


zum Luftleiter
Vs
Induktor
Schaltbrett
Regulier-widerstand
Fritter
Ue Sp
Ve
R1
Kond.
T
Turbinenmotor
Turbinenunterbrecher

eine, der Hörempfänger, besteht aus einer elektrolytischen Zelle nebst Telephon, der andere, der Schreibempfänger, aus einer Frittröhre nebst Morseschreibapparat.

Die Sendeeinrichtung.

Der Primärkreis des Induktoriums. Verfolgen wir zunächst an der Hand der Fig. 106 (a. f. S.) den Stromweg für die Sendeapparate. Das an der Wand befestigte in Fig. 105 sichtbare Induktorium kann primär nach Belieben entweder mit unterbrochenem Gleichstrom oder mit Wechselstrom erregt werden. Der letztere wird von einer besonderen Wechselstrommaschine geliefert, die hier nicht eingezeichnet ist; der Gleichstrom mit 110 Volt Spannung wird dem Netz einer elektrischen Zentrale entnommen.

Die Drähte 1 und 14 dienen als Zuleitungen für den primären Strom; sie sind daher entweder mit den Bürsten der Wechselstrommaschine oder mit den Polen des Gleichstromnetzes zu verbinden. Je nachdem nun Wechsel- oder Gleichstrom verwendet wird, muß der Umschalter 4 nach links oder nach rechts umgelegt werden.

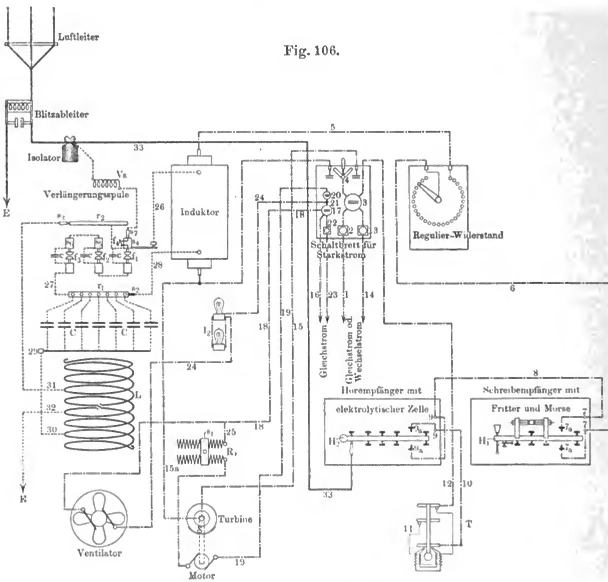
Nehmen wir zunächst den ersten Fall an, so haben wir folgenden Stromweg: Der Wechselstrom der Maschine geht über den Draht 1, die Sicherung 2, einen doppelpoligen Ausschalter 3 zum Umschalter 4. Dieser ist nach links eingelegt. Hierdurch wird eine Verbindung mit der Primärwickelung des Induktors hergestellt, von welcher die Leitung weiter über den Draht 5, einen Regulierwiderstand, den Draht 6 zu einem Stöpselkontakt 7 im Schreibempfänger führt und sodann über einen durch den Hebelumschalter H_1 zu schließenden Kontakt 7a, den Draht 8, noch einen Stöpselkontakt 9 im Hörempfänger, den Kontakt 9a des Hebelumschalters H_2 und den Draht 10 an den Arbeitskontakt der Taste T. Der Körper dieser Taste ist durch den Draht 11 über einen Elektromagneten mit der Ruheschiene unlösbar verbunden. Wird der Tastenhebel gedrückt, so findet daher der Strom den Weg weiter über den Draht 12, den zweiten Pol des Ausschalters 3, die Sicherung 13 und den Draht 14 zur Wechselstrommaschine zurück. Zum Einsetzen in die Stöpselkontakte 7 und 9 dienen zwei Doppelstöpsel; in dem ersten endigen die Drähte 6 und 8, in dem anderen die Drähte 8 und 10. Die Kontakte 7a und 9a sind geschlossen, wenn die Hebelschalter H_1 und H_2 in die Höhe (d. i. für den Leser aus der Papierfläche heraus) gestellt werden. In der anderen Lage der Schalter wird eine Anzahl von Kontakten geschlossen, welche die Empfangsapparate einschalten. Durch diese Hebelschalter wird der Empfangsstromkreis unterbrochen, „verblockt", wenn der Senderkreis geschlossen ist, und umgekehrt.

Um Zeichen senden zu können, ist also erforderlich: den Ausschalter 3 zu schließen, den Umschalter 4 nach links zu legen, die Doppelstöpsel, die ebenfalls zur Verblockung dienen, bei 7 und 9 einzusetzen und die Hebel H_1 und H_2 senkrecht nach oben zu stellen. Dann wird mit jedem Druck auf die Taste T ein Wechselstrom aus der Maschine durch die primäre Wickelung des Induktoriums geschickt.

Im zweiten Fall, wenn mit unterbrochenem Gleichstrom gearbeitet werden soll, sind die Drähte 1 und 14 statt mit der Wechselstrommaschine mit den Polen des Gleichstromnetzes zu verbinden. Durch Umlegen des Schalters 4

nach rechts wird der Gleichstrom, bevor er das Induktorium erreicht, mit Hilfe der Drähte 15 und 15a durch einen Quecksilberstrahlunterbrecher geführt. Der weitere Verlauf ist derselbe wie vorher beim Wechselstrom. Der Unterbrecher wird durch einen aus dem Gleichstromnetz gespeisten Motor angetrieben. An das Netz sind nämlich die Drähte 16 und 23 dauernd angeschlossen; sie führen über die Sicherung 22 und den doppelpoligen Ausschalter 17 zu den Drähten 18 und 24. Von dem letzteren wird im Punkte 21 der Draht 19 durch den einpoligen Ausschalter 20 abgezweigt, so daß, wenn

Fig. 106.



die beiden Ausschalter geschlossen sind, die Netzspannung an den Drähten 18 und 24 wie an 18 und 19 liegt. Zwischen den beiden erstgenannten Leitungen liegt der Motor zum Betriebe eines Ventilators für das Erregergestell. Die beiden letztgenannten Drähte führen die Betriebsspannung dem Turbinenmotor zu, welchem ein Widerstand R_1 vorgeschaltet ist. In Fig. 105 ist der Widerstand links auf dem Tische zu sehen.

Durch Verschieben des Kontaktes s_1 kann der Wert des Widerstandes verändert und die Umdrehungszahl des Motors geregelt werden. Eine solche Regelung ist notwendig, da der Induktor, ein Resonanzinduktor, auf die Periodenzahl der Wechselstrommaschine abgestimmt ist, und daher beim

Betriebe mit unterbrochenem Gleichstrom eine ganz bestimmte Unterbrechungszahl erhalten muß.

Damit der unterbrochene Gleichstrom die primäre Wickelung des Induktoriums durchfließt, wenn die Taste *T* gedrückt wird, ist erforderlich, den Umschalter 4 nach rechts zu legen und außer den beim Betriebe mit Wechselstrom besprochenen Schaltungen die Ausschalter 17 und 20 zu schließen.

Der sekundäre Kreis des Induktoriums. Das Erregergestell. Von den Klemmen der sekundären Wickelung des Induktors führen die punktiert gezeichneten Leitungen 26 und 28 zu dem Erregergestell, das in Fig. 105 links am Fenster zu sehen und in den Figg. 107 und 108 (a. f. S.) besonders abgebildet ist. Es ist etwa 85 cm hoch und enthält den Schwingungskreis, die Funkenstrecke und den Ventilator.

Fig. 107.

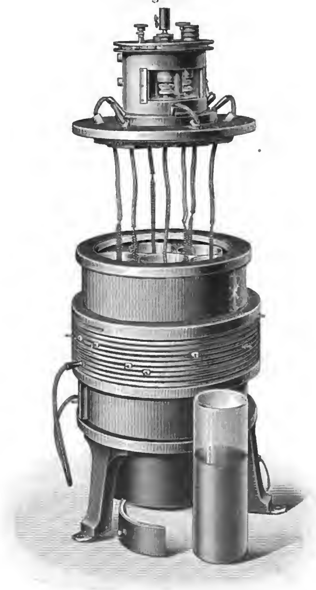


Der ganze Apparat ruht auf einem Dreifußgestell aus Holz, welches auf einem durchlöcherten Boden sieben Leydener Flaschen trägt. Die Flaschen sind von einem Mantel *M* umschlossen und daher in Fig. 107 nicht sichtbar. In Fig. 108 dagegen, wo der Deckel des Erregergestelles abgehoben ist, kann man die Flaschen erkennen. Eine von ihnen ist bei der Aufnahme des Bildes neben den Apparat gestellt worden.

Der aus Holz hergestellte Deckel trägt die dreifach unterteilte Funkenstrecke und deren Zubehör. Auf ihm ist zunächst ein starker Ring r_1 aus Blei befestigt. Über diesem erhebt sich ein zur Schalldämpfung mit dicker Filzbekleidung versehener Hohlzylinder. Damit das Innere des Hohlzylinders sichtbar wird, ist in den Abbildungen der Verschluß von einer seitlichen Öffnung entfernt worden. Man erblickt die Elektroden f_1 und f_2 von zwei

Teilfunkenstrecken; die der dritten liegen verdeckt im Hintergrunde. Die drei Funkenstrecken sind mittels breiter Messingschienen hintereinander geschaltet. Ihre Elektroden bestehen aus tellerförmigen Zinkstücken von etwa 8 mm Dicke und 33 mm Durchmesser. Die unteren Elektroden stehen fest, die oberen sind an Stöpseln mit Ebonitgriff s_4, s_5 und s_6 befestigt und können in senkrechter Richtung verschoben werden. Diese Einrichtung gestattet, den Abstand der Elektroden zu verändern, auch einzelne Funkenstrecken ganz auszuschalten, indem man ihre Elektroden zusammenschiebt. Auf diese Weise läßt sich die Länge des Funkens und damit die dem Schwingungskreise zugeführte Spannung nach Belieben verändern.

Fig. 108.



Parallel zu den Funkenstrecken liegen kleine Kondensatoren c, welche ähnlich wie die Leydener Flaschen zwei zylindrische Belegungen besitzen.

Der Ring r_1 ist durch die Stöpselschnur 28 mit dem Induktorium verbunden. Die übrigen im Ringe r_1 steckenden sechs Stöpselschnüre endigen in Messingketten, wie in Fig. 108 zu sehen ist. Diese blanken Ketten reichen in die Leydener Flaschen und stellen die metallische Verbindung mit der inneren Belegung her. Eine gleichartige Kette ohne Stöpsel ist unlöslich mit dem Ringe r_1 verbunden; sie dient zum Anschluß der siebenten (mittleren) Flasche. Durch Herausnehmen oder Einsetzen von Stöpseln in den Ring r_1 kann die Kapazität des Schwingungskreises verändert werden.

Um den Mantel M des Erregergestells ist ein breiter Hartgummiring RR gelegt (Fig. 107), in welchen eine tiefe, in Schraubengängen verlaufende Rille geschnitten ist. In dieser Rille liegen die Windungen der aus etwa 3 mm starkem Kupferdraht hergestellten Selbstinduktionsspule. Stöpselschnüre gestatten, einzelne Windungen der Spule abzuzweigen und in den Schwingungskreis einzuschalten. Um das Versetzen der Kontaktstöpsel zu erleichtern, ist über alle Windungen der Spule eine größere Anzahl von verschiebbaren Schleifkontakten verteilt, auf welche die Stöpsel der Schnüre aufgesetzt werden können. Unterhalb des Holzbodens ist in einer Blechbekleidung V der Ventilator angebracht, der einen Luftstrom durch den ganzen Apparat treibt.

Verfolgen wir nach Fig. 106 den Stromlauf im Erregergestell, so sehen wir, daß die hohe Spannung des Induktoriums durch den Draht 26 über eine Klemme an die erste Funkenstrecke f_1 geführt ist; f_2 und f_3 stellen die beiden anderen, in Reihe an f_1 angeschlossenen Teilfunkenstrecken dar. Die parallel zu ihnen liegenden Kondensatoren sind mit c bezeichnet. Die letzte Elektrode der Funkenstrecke f_3 ist durch den Draht 27 mit dem bleiernen Ringe r_1 verbunden, von welchem aus durch den Stöpsel s_2 eine Leitungsschnur 28 nach dem Induktorium zurückführt. An die Funkenstrecke schließt sich der Schwingungskreis an. Die innere Belegung der mittleren Flasche liegt über dem Bleiring r_1 dauernd an der unteren Elektrode von f_3; diejenigen der anderen Flaschen können parallel dazu durch die Stöpselschnüre angeschaltet werden. Die äußeren Belegungen der sieben Flaschen sind alle untereinander und mit der Klemme 29 verbunden. Von hier aus führt der Draht 30 zu einem der auf der Selbstinduktionsspule S verschiebbaren Kontakte. Mittels ebensolcher Kontakte sind die Drähte 31 und 32 angeschlossen; 32 führt zur Erde, 31 zu einem Stöpsel s_3, welcher an dem in horizontaler Ebene drehbaren Metallringe r_2 befestigt ist. Der Ring r_2 hat leitende Verbindung zur oberen Elektrode der ersten Funkenstrecke f_1. Hierdurch wird der Schwingungskreis geschlossen. Seine Schaltung sei kurz wiederholt: Von der oberen Elektrode von f_1 durch die drei Funkenstrecken f_1, f_2 und f_3, den Draht 27, den Ring r_1, die inneren Belegungen der Leydener Flaschen C, deren äußere Belegungen, den Draht 30, die Spule S, den Draht 31 und über den Stöpsel s_3 sowie den Ring r_2 zur Funkenstrecke f_1 zurück.

An die obere Elektrode der Funkenstrecke f_1 ist ferner eine kleine vierte Funkenstrecke f_4 angeschlossen, mit welcher der Luftleiter durch einen besonderen Stöpsel s_7 verbunden wird. Die Einrichtung dieser kleinen Schaltfunkenstrecke ist in den Figg. 106 und 107 zu erkennen.

Zwei Messingschrauben, welche so in den Stöpselgriff s_4 eingeschraubt sind, daß ihre Köpfe von etwa 18 mm Durchmesser etwas übereinander greifen, dienen als Elektroden dieser Funkenstrecke. Durch Anziehen oder Lockern mittels eines Schraubenziehers wird der gegenseitige Abstand der Köpfe auf weniger als 1 mm gebracht.

Der Luftleiter endigt in dem Stöpsel s_7. Setzt man diesen in den Griff s_4, so erhält er Verbindung mit dem oberen Pol der Schaltfunkenstrecke f_4.

Die Schaltfunkenstrecke hat den Zweck, den Stromweg zwischen dem Luftleiter und dem Erregerkreise für niedrige Spannungen zu sperren. Den ankommenden Wellen, die zu schwach sind, den Luftraum zwischen den Elektroden zu überspringen, wird auf diese Weise der Weg in das Erregergestell abgeschnitten, dagegen sind die im Kondensatorkreise erzeugten, von der Station ausgehenden Schwingungen so kräftig, daß sie die Schaltfunkenstrecke durch einen Funken kurz schließen und fast ungehindert in den Luftleiter gelangen. So lange daher Schwingungen im Erregerkreise erzeugt werden, findet der durch den Stöpsel s_7 angeschlossene Luftleiter seine Fortsetzung über f_4, r_2, s_3 und den Draht 31 zur Selbstinduktionsspule und von dieser über den Draht 32 zur Erde. Die Schaltung ist hiernach die eines gekoppelten Systems, wie es in Fig. 82 (S. 89) schematisch dargestellt ist.

Durch die Erdung der Funkenstrecke f_1 über die Drähte 31 und 32 ist auch das Induktorium über den Draht 26 mit Erde verbunden. Es ist

daher gefährlich, den anderen Pol des Induktoriums zu berühren, weil sich dann die hohen Spannungen über den stets mit der Erde in leitender Verbindung stehenden menschlichen Körper ausgleichen würden. Der nicht geerdete Pol des Induktors ist zur Warnung rot gefärbt.

Wo die Kontakte 30 und 31 anzubringen sind, wird durch die Wellenlänge bestimmt, auf welche der Schwingungskreis eingestellt werden soll. Mit der Entfernung der Kontakte voneinander wird die Selbstinduktion des Erregerkreises vermehrt, seine Eigenperiode daher verlängert.

Der dem Kondensatorkreise und dem Luftleiter gemeinsame Teil der Selbstinduktion liegt zwischen den Drähten 31 und 32. Seine Größe und damit der Grad der Koppelung kann durch die Verschiebung des Kontaktes 32 verändert werden. Durch Annäherung des Kontaktes 32 an 31 wird die Koppelung loser, durch Annäherung an den Kontakt 30 wird sie fester.

Der Luftleiter einer Station der hier beschriebenen Art besteht aus drei parallel geführten und durch isolierende Glasknüppel auseinander gehaltenen Drahtlitzen zu je sieben verseilten Drähten von 0,8 mm Dicke.

Da mit einer Wellenlänge von rund 400 m gearbeitet werden soll, die Länge des Luftleiters aber bei weitem nicht 100 m erreicht, muß eine Verlängerungsspule vorgeschaltet werden. Sie ist in Fig. 105 auf S. 112 links oben auf einer Wandkonsole ruhend abgebildet und ebenso wie im Stromlaufschema (Fig. 106 auf S. 114) mit *Vs* bezeichnet.

An der Stelle, wo der Luftleiter ins Freie tritt, ist eine aus einem Plattenblitzableiter und einer Drahtspule zusammengesetzte Blitzschutzvorrichtung angeschaltet. Zwei kreisrunde Metallplatten, von denen die eine mit dem Luftleiter, die andere mit der Erde in Verbindung steht, werden so nahe einander gegenüber gestellt, daß die in den Luftleiter eintretenden Blitzspannungen zwischen ihnen überspringen können. Um aber zu verhüten, daß die hohen Spannungen der ausgesandten Wellen sich auf diesem Wege ebenfalls ausgleichen, ist der Zwischenraum zwischen den beiden Platten durch eine Drahtspule mit hoher Selbstinduktion überbrückt. Sehr zuverlässig ist dieser Blitzschutz jedoch nicht, weil der Abstand der beiden Platten nicht so klein gemacht werden darf, wie es zur ganz sicheren Ableitung eines Blitzes erforderlich wäre. Geschähe das, so würden die starken Spannungen der ausgehenden Wellen trotz der hohen Gegenspannung, die sie vermöge ihrer hohen Periodenzahl in der Drahtspule finden, den Luftzwischenraum im Plattenblitzableiter doch durchschlagen.

Betriebsvorschriften für die Sendestation. Um die Sendestation in Betrieb zu setzen, werden die früher besprochenen Schaltungen zur Erregung des Induktoriums mit Wechsel- oder mit unterbrochenem Gleichstrom ausgeführt. Bei der Verwendung von unterbrochenem Gleichstrom ist darauf zu achten, daß man die Unterbrechungszahl mit den Erfordernissen des Resonanzinduktors in Einklang bringt. Dies geschieht (s. S. 114) dadurch, daß man mit Hilfe des Regulierwiderstandes die Umdrehungszahl des Turbinenmotors so lange ändert, bis bei einem unverändert beibehaltenen Zwischenraum in der Funkenstrecke die kräftigsten Funken auftreten. Hiernach ist die Wellenlänge des Luftleiters zu bestimmen. Zu diesem Zweck wird der Luftleiter in der sogenannten Marconischaltung erregt, d. h. es werden, wie in

Fig. 77 auf S. 81 dargestellt ist, der Sendedraht und die Erdleitung unmittelbar an die Pole der Funkenstrecke gelegt. Um die Marconischaltung auszuführen, entfernt man die Schnur 31 (Fig. 106 auf S. 114), löst den Kontakt 30, schließt den Luftleiter durch Einsetzen des Stöpsels s_7 an und legt den Ring r_1 mit einem Hilfsdraht unmittelbar an Erde. Dann ist das Induktorium nur durch die Funkenstrecke geschlossen, an deren Enden Luftleiter und Erde liegen. Daß die inneren Belegungen der Leydener Flaschen noch mit dem Ringe r_1 in Verbindung bleiben, hat keinen Einfluß auf die Wellenlänge, weil der Kontakt 30 offen ist. Alsdann wird, nachdem die Taste T geschlossen ist, die Wellenlänge des Luftdrahtes mittels eines Meßstabes oder eines Wellenmessers bestimmt und im Bedarfsfalle durch Veränderung der Verlängerungsspule V_s nach Wunsch eingestellt.

Hiernach ist der geschlossene Schwingungskreis auf dieselbe Wellenlänge abzustimmen. Der Luftleiter und die Erde werden von der Funkenstrecke getrennt, auch wird die Erde vom Kontakt 32 gelöst, dagegen wird die Verbindung des Drahtes 30 mit der Selbstinduktionsspule S und diejenige des Drahtes 31 mit dem am Ringe r_2 befestigten Stöpsel s_3 hergestellt. Dann ist der Schwingungskreis an der Funkenstrecke über die Selbstinduktionsspule und die Leydener Flaschen zur Funkenstrecke zurück geschlossen. Um seine Wellenlänge mit derjenigen des Luftdrahtes in Übereinstimmung zu bringen, wird der Wellenmesser auf die verlangte Wellenlänge eingestellt. Dann werden die Kapazität und die Selbstinduktion des Schwingungskreises so lange verändert, bis sie sich mit derjenigen des Wellenmessers in Resonanz befinden, bis also z. B. das Luftthermometer des Dönitzschen, oder das Millivoltmeter des Seibtschen Wellenmessers einen Höchstwert anzeigt. Der absolute Wert des Maximums wird bei dieser Anordnung sehr viel höher gefunden, als bei der Messung des Luftleiters; das ist eine Bestätigung dafür, daß die Wellen im geschlossenen Kreise weniger gedämpft und daher viel kräftiger sind, als in dem ausstrahlenden Luftleiter. Ihre Energie ist so groß, daß man den Wellenmesser von den induzierenden Windungen des Erregerkreises ziemlich weit entfernen muß, damit die Ausschläge den Bereich der Skala nicht überschreiten. Da die Stärke der Wellenströme mit der Kapazität des Erregerkreises wächst, wird man die sieben Leydener Flaschen sämtlich einschalten und die Abstimmung nur durch Veränderung der Selbstinduktion herbeizuführen suchen. Die Größe der Spule S ist so bemessen, daß man beim Wegfall einer oder einiger Flaschen, z. B. wenn sie durchschlagen werden, die Abstimmung durch eine entsprechende Vermehrung der Selbstinduktion wieder herstellen kann, um den Betrieb aufrecht zu erhalten. Allerdings vermehrt man mit der Zahl der in den Schwingungskreis geschalteten Selbstinduktionswindungen auch den Widerstand und damit die Dämpfung des Kreises.

Sind Schwingungskreis und Luftleiter auf gleiche Wellenlänge abgestimmt, so werden sie durch das Einsetzen des Stöpsels s_7 in s_4 und durch das Anlegen der Erde bei Kontakt 32 miteinander gekoppelt. Dieses gekoppelte System sendet dann, wie wir früher auf S. 87 gesehen haben, zwei von der bisher bestimmten Welle verschiedene Wellen aus, eine längere und eine kürzere, die voneinander um so mehr verschieden sind, je fester die Koppelung ist, d. h. also, je weniger die Kontakte 30 und 32 voneinander abstehen.

Die Empfangseinrichtung.

Die Anordnung der Empfangsapparate. Ein Stromlaufschema der Empfangsstation ist in Fig. 109, außerdem unter Berücksichtigung aller Einzelheiten in Fig. 110 auf Tafel I gegeben. Die zur Aufnahme der Zeichen mit der elektrolytischen Zelle und dem Hörer sowie die zur Erzielung von Morseschrift notwendigen Apparate sind in Fig. 110 je durch eine Umrahmung mit doppelter Linie besonders hervorgehoben. Um die praktische Verwendung und die Handhabung zu erleichtern, sind diese Apparate mit allen

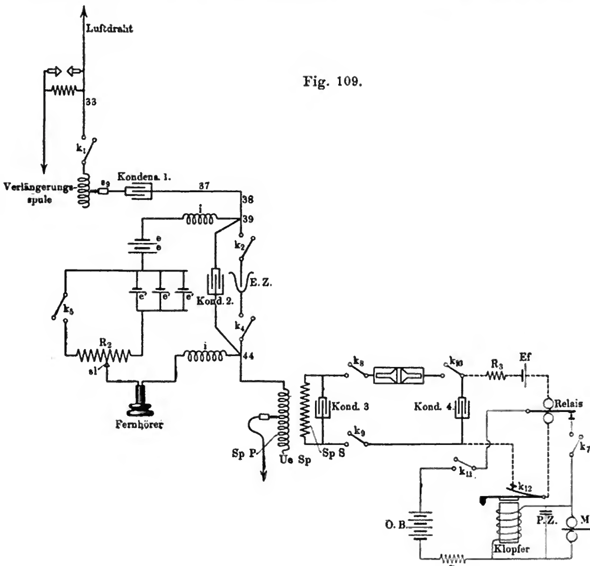
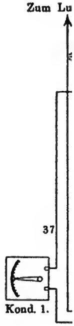


Fig. 109.

Zubehörteilen, und zwar diejenigen für den Hör- und diejenigen für den Schreibempfang für sich auf je einem Grundbrett übersichtlich angeordnet und befestigt worden[1]). Außer ihnen enthält die Station zur Abstimmung des Luftleiters auf die ankommenden Wellen noch den Kondensator 1 als Erdkondensator (in Fig. 110 links unten) und die Verlängerungsspule *Ve* (in Fig. 110 in der Mitte). Der Fritter wird nicht unmittelbar in den Luftleiter eingeschaltet, sondern an die sekundäre Wickelung eines Übertragers *Ue Sp* (Fig. 109 und 110) angeschlossen, dessen primäre Spule *Sp P* im Luftleiter

[1]) Diese Zusammenstellungen der Apparate sind auf Tafel I in den Figg. 111 und 112 besonders abgebildet.

Tafel I.





Arendt, W

hinter der elektrolytischen Zelle *EZ* liegt. Hierdurch wird der auf S. 83 erörterte Übelstand vermieden, daß die Eigenperiode des Luftleiters durch das Ansprechen des Fritters verändert wird.

Wenn empfangen werden soll, legt man die in den Figg. 110, 111 und 112 sichtbaren Schalthebel H_1 und H_2 horizontal ein, wodurch die Kontakte k_1 bis k_{11}, die in Fig. 109 als besondere Schalter getrennt gezeichnet sind, geschlossen werden; gleichzeitig öffnen sich die Blockierungskontakte 7a und 9a (vgl. auch Fig. 106 auf S. 114). Die Kontakte k_1 bis k_{11} schließen die Empfangsstromkreise, 7a und 9a trennen den primären Senderkreis, so daß das Induktorium nicht erregt werden kann.

Der Empfang mit der elektrolytischen Zelle und dem Hörer. Die von einer fernen Station ankommenden Schwingungen werden durch den Luftleiter, die Antenne, aufgefangen, d. h. die ankommenden Wellen erregen in dem Luftleiter Schwingungen (vgl. S. 62), welche, unter Ausnutzung der

Fig. 113.

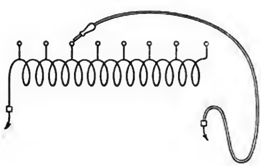


Fig. 114.

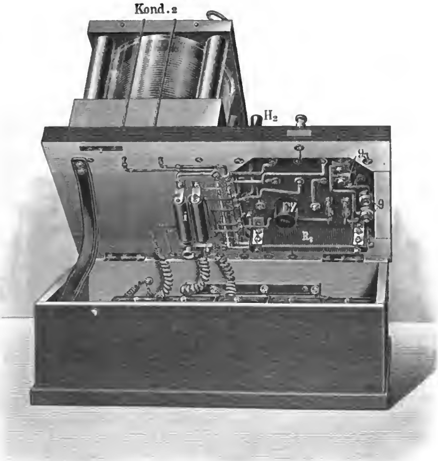


Resonanzwirkungen nach Möglichkeit verstärkt, der als Wellendetektor eingeschalteten Schloemilch-Zelle zugeführt werden. Nach Fig. 106 auf S. 114 teilt sich der Stromweg hinter dem dort gezeichneten Isolator. Ein Weg führt durch die Spule *Vs* zur Schaltfunkenstrecke f_4, durch die er jedoch nach den Erörterungen auf S. 117 für die ankommenden Wellen gesperrt wird. Die ankommenden Wellen folgen daher nur dem Draht 33, welcher sie über einen Stöpsel s_8 zu dem Kontakt k_1 am Hebel H_2 (s. Figg. 109, 110 und 111) leitet. Über k_1 geht die Verbindung weiter durch die Drähte 34 und 35 zur Verlängerungsspule *Ve*, von deren Windungen gleichmäßig verteilte Abzweigungen zu den am vorderen Rande angeordneten Stöpsellöchern führen, so daß eine beliebige Anzahl der Windungen mit Hilfe des Stöpsels s_9 eingeschaltet werden kann. Eine schematische Darstellung und die äußere Ansicht des Apparates finden sich in den Figg. 113 und 114. Der Draht 36 setzt die Verbindung fort zu dem Kondensator 1, welcher genau dieselbe Einrichtung zur kontinuierlichen Veränderung seiner Kapazität besitzt, wie der im Dönitzschen Wellenmesser verwendete Kondensator (Fig. 64, S. 68). Vom Kondensator 1 gelangen die Ströme durch die Drähte 37 und 38 zu einem Verteilungspunkte 39. Von hier aus führt ein Draht 40 über den Kontakt k_2, den Draht 41, die elektrolytische Zelle *EZ*, den Draht 42, Kontakt k_4 zu einem zweiten Verteilungspunkte 44 und weiter durch den Draht 45, die

primäre Wickelung der Übertragungsspule *Ue Sp*, die Drähte 46 und 47 und über den Kontakt k_6 am Hebel H_1 des Schreibempfangsystems zur Erde *E*.

Parallel zu der Zelle *EZ* liegt eine Batterie, welche die Zelle unter Spannung setzen soll. Diese Spannung muß stets so groß sein, daß sie die Gegenspannung der Zelle eben überwindet; und zwar muß sie, weil die Zellenspannung schwankt, kontinuierlich verändert werden können. Auf die Zelle wirken zunächst zwei Trockenelemente *e* (links unten in Fig. 110, links in der Mitte der Fig. 109). Die Spannung der Zelle ist aber noch größer als diejenige der beiden Elemente zusammen. Es muß ihnen deshalb noch eine Spannung vorgeschaltet werden, welche durch folgende Einrichtung veränderlich gemacht ist. Drei parallel miteinander verbundene Trockenelemente *e'*

Fig. 115.



senden, so lange der Kontakt k_5 geschlossen ist, über den nicht veränderlichen Widerstand R_2 dauernd einen Strom, dessen Stärke mit *J* bezeichnet werden mag. An den Enden von R_2 herrscht daher nach dem Ohmschen Gesetz ein Spannungsunterschied vom Betrage $J \cdot R_2$. Davon wird ein in weiten Grenzen veränderlicher Teil durch den Zweigkontakt *sl* abgezweigt und als Zusatzspannung mit den beiden Elementen *e* in Reihe geschaltet. Steht der Schleifkontakt *sl* ganz nach links, so ist die von ihm abgenommene Spannung gleich Null, steht er ganz rechts, so erreicht sie ihren Höchstwert.

Zwischen den Trockenelementen *e* und *e'*, deren Spannung auf die Zelle wirkt, und der Zelle selbst liegen in dem von den Abzweigpunkten 39 und 44 ausgehenden Leiterkreise noch die zwei Drosselspulen *i* und zwei oder mehrere parallel geschaltete Hörtelephone. Die Drosselspulen haben den

Zweck, den Weg durch die Elemente für die ankommenden Wellen zu versperren. Die Wellen sind auf diese Weise gezwungen, durch die Zelle *EZ* zu gehen.

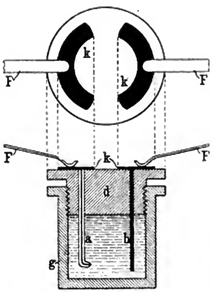
Wenn die Spannung so stark ist, daß eine Gasentwickelung eintritt, so wird die Zelle von einem Strom durchflossen, dessen Stärke stetig wechselt, weil der Widerstand der Zelle andere Werte hat, je nachdem die Gasbläschen auf den Elektroden haften bleiben oder sich davon loslösen. Diese wechselnde Stromstärke verursacht in den Telephonen ein Rauschen. Die auf die Zelle wirkende Spannung reguliert man durch das Verschieben des Schleifkontaktes *sl* nun so, daß die Gasentwickelung eben aufhört, daß also das Rauschen im Fernhörer gerade verschwindet. Unter dem Einfluß ankommender Wellen wird die Gasentwickelung wieder eingeleitet; für die Dauer jeder Welle tritt daher das Rauschen von neuem auf. Werden die Wellen von der fernen Station im Takte der Morsezeichen ausgesandt, so lassen sich diese Zeichen nach dem Gehör aufnehmen.

Zwischen den Abzweigpunkten 39 und 44 liegt ferner noch der regulierbare Kondensator 2 zu der elektrolytischen Zelle und der Batterie parallel. Der sehr hohe Widerstand der Zelle gegen den Durchgang der Wellen kann die Dämpfung des empfangenden Luftleiters derart vermehren, daß überhaupt keine Schwingungen mehr zustande kommen. Um dies zu verhüten und das Schwingungssystem abstimmfähig zu erhalten, muß eine Selbstinduktion oder eine Kapazität zur Zelle parallel geschaltet werden, deren Betrag naturgemäß einen gewissen Einfluß auf die von der Zelle aufgenommene Energie hat. Denn je geringer der Widerstand ist, den die parallel geschaltete Selbstinduktion oder Kapazität dem Wechselstrome entgegensetzt, um so weniger Strom durchfließt die Zelle. Da nun der Kondensator 2 veränderlich ist, mithin die Kapazitätsreaktanz nach Belieben vermehrt oder vermindert werden kann (vgl. S. 27), hat man es in der Hand, den durch die Zelle tretenden Strom nach Bedarf zu verstärken oder zu schwächen. Die Erfahrung hat gezeigt, daß bei einer bestimmten Einstellung des Kondensators 2, die ermittelt werden muß, die Wirkung der Zelle am kräftigsten ist. Wird die Kapazität sehr klein gemacht, so werden die im Hörtelephon ankommenden Zeichen immer schwächer; sie verstummen ganz, sobald der kombinierte Widerstand der Zelle und des parallel geschalteten Kondensators so hoch geworden ist, daß Schwingungen nicht mehr auftreten können. Wird im Kondensator 2 eine größere Kapazität eingeschaltet, als der günstigsten Einstellung entspricht, so werden die Zeichen im Hörer ebenfalls immer schwächer, weil immer mehr Strom durch den Kondensator an der Zelle vorbeigeleitet wird. Die Zelle spricht aber noch auf außerordentlich schwache Ströme an, denn man kann ihr eine verhältnismäßig sehr hohe Kapazität parallel schalten, ohne daß die Zeichen im Fernhörer ganz verschwinden.

Der elektrolytische Empfänger nebst Zubehör. Ein Holzkasten, den die Fig. 111 auf Tafel I mit geschlossenem, die vorstehende Fig. 115 dagegen mit geöffnetem Deckel zeigt, enthält in seinem Innern die mit *e* und *e'* bezeichneten fünf Trockenelemente. Auf und an seinem Deckel sind die einzelnen Apparate befestigt, die zusammen den Hörempfänger bilden. Der in beiden Figuren sichtbare Widerstand R_2 besteht aus einem blanken Draht,

welcher um einen Kern aus Schiefer gewickelt ist. Der Schleifkontakt *sl* ist in Fig. 111 zu bemerken. Die Drosselspulen *i* sind an der unteren Seite des Deckels befestigt. Oben auf dem Deckel ist der Kondensator 2 angebracht, dessen Kapazität zwischen 0 und 0,003 Mf verändert werden kann. Er ist ebenso wie der Kondensator 1 (siehe S. 121) dem Kondensator im Wellenmesser von Dönitz gleich eingerichtet. In seinem Sockel befinden sich zwei unveränderliche Glimmerkondensatoren, deren Kapazität 0,003 Mf beträgt. Sie können mit dem Kondensator 2 zusammengeschaltet werden. Die eine der Belegungen dieser Zusatzkondensatoren ist mit der beweglichen Plattenreihe des Kondensators 2 dauernd verbunden; die anderen Belegungen stehen durch biegsame Schnüre mit den Stöpseln s_9 und s_{10} (Fig. 111) in Verbindung, mit deren Hilfe sie nach Bedarf einzeln oder gleichzeitig an die feste Plattenreihe angeschaltet werden. Auf diese Weise läßt sich jeder Wert zwischen 0 und 0,009 Mf zusammenstellen.

Fig. 116.



Zum Einschalten der Fernhörer dienen biegsame Schnüre mit Doppelstöpseln. Damit fremde Geräusche das Abhören der Zeichen nicht beeinträchtigen, werden die Hörmuscheln mit Gummiwulsten versehen, welche sich an den Kopf des Hörenden fest anlegen und eine Abdichtung gegen jeden von außen kommenden Schall bilden.

Die von Schloemilch angegebene elektrolytische Zelle [1]) ist mit ihrem unteren Teile, der einen kleineren Durchmesser hat als der obere, in eine im Deckel angebrachte runde Öffnung eingesetzt. In Fig. 111 ist der obere und in Fig. 115 der untere Teil sichtbar. Die Zelle, von welcher die Fig. 116 die Draufsicht auf den Deckel und den Durchschnitt zeigt, besteht aus einem starkwandigen becherförmigen Gefäß *g* aus Hartgummi, das nach der Füllung mit verdünnter Säure mittels eines Hartgummideckels *d* mit Gewinde säuredicht abgeschlossen wird. Die beiden Elektroden aus Platin sind an zwei auf den Deckel aufgesetzte kreisförmig gebogene Metallbelegungen *k* geführt, welche die Verbindung nach den zwei auch in Fig. 111 sichtbaren Federn *F* vermitteln. Die positive, unten etwas umgebogene Elektrode *a* ist in ein Glasrohr eingeschmolzen, aus welchem der hier nur 0,001 mm starke Platindraht in einer Länge von 0,01 mm heraustritt. Die negative Elektrode *b* kann in beliebiger Form und Größe hergestellt werden.

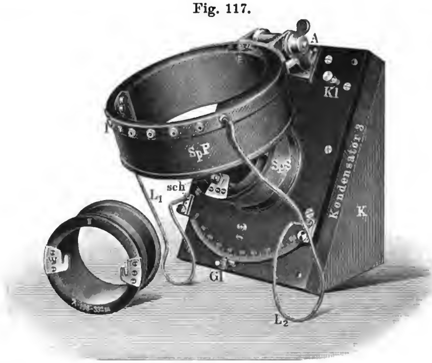
Wenn das elektrolytische Empfangssystem allein verwendet werden soll, muß die von der Zelle herkommende Leitung mit einem Erddraht verbunden werden. Hierzu dient, wie Fig. 110 erkennen läßt, der Kontakt k_3.

Sollen dagegen die ankommenden Wellen zur Übertragungsspule weiter geleitet werden, dann wird der Erddraht an die in der Figur angegebene Leitungsklemme nicht angelegt.

[1]) W. Schloemilch, Ein neuer Wellendetektor für drahtlose Telegraphie. E. T. Z. 1903, S. 959 ff.

Die Übertragungsspule dient zur Erregung des Fritterkreises. Sie ist in Fig. 117 abgebildet; in den Figg. 109 auf S. 120 und 110 auf Tafel I ist sie mit *Ue Sp* bezeichnet. Ein dreikantig geschnittener, pultartig aufgestellter Holzklotz *K* dient als Lager für einen veränderlichen Kondensator, den Kondensator 3. In dem Bilde ist von diesem nur der Gleitstift *Gl* zu sehen, der an einer Skala vorbeigeschoben wird und die Stellung der ineinander greifenden Kondensatorplatten anzeigt. Auf dem Deckel dieses Kondensators sind die primäre und die sekundäre Spule des Übertragers befestigt. Die primäre Spule *Sp P* ist auf einen kräftigen Hartgummiring aufgewickelt. Eine Anzahl von Stöpselkontakten *l* gestattet, wie bei der Spule *Ve* (Fig. 114 auf S. 121), einzelne Windungen auszuschalten, die wirksame Selbstinduktion also zu verändern. Die Leitung tritt bei der Klemme L_1 ein und durch die Stöpselschnur über die Klemme L_2 wieder aus. Die Spule *Sp P* ist bei *A*

Fig. 117.



um eine Achse drehbar und kann mittels einer Schraube mit Flügelmutter in jeder Stellung festgestellt werden. Wird die Spule ganz bis auf die Grundplatte niedergedrückt, so umschließt sie konzentrisch die dort befestigte sekundäre Spule *Sp S.* Diese kann gegen größere oder kleinere gleichartige Spulen ausgewechselt werden. Eine Ersatzspule befindet sich in der Zeichnung links neben dem Apparat, noch einige mehr sind in der Gesamtansicht der Station (Fig. 105 auf S. 112) zu sehen. Mittels der Winkel *w* und der Schrauben *sch* werden die Sekundärspulen festgehalten und zu dem vorher erwähnten Kondensator parallel eingeschaltet. Mit diesem bilden sie einen geschlossenen Schwingungskreis, an welchen der Fritter angeschaltet wird. (Vgl. die schematische Darstellung in Fig. 109 auf S. 120 und in Fig. 110 auf Taf. I.)

Die kräftigste Wirkung auf den Fritter wird dann erzielt, wenn sich die Eigenperiode im Sekundärkreise des Übertragers mit der Länge der den Primärkreis durchfließenden Wellen in Resonanz befindet. Die Abstimmung auf Resonanz erfolgt durch die Einstellung des Kondensators 3 am Gleithebel *Gl* und durch die Auswahl einer passenden Sekundärspule. Auf diesen

sind die Wellenlängen vermerkt, welche sie im Verein mit dem veränderlichen Kondensator beherrschen. Die in Fig. 117 gezeichnete Ersatzspule z. B. trägt die Aufschrift $\lambda = 198 - 332$ m, d. h. sie schwingt in einer Welle von 198 m, wenn der Kondensator auf den kleinsten, in einer Welle von 332 m, wenn der Kondensator auf seinen größten Wert eingestellt ist.

Die Zuführungen zu dem sekundären Schwingungskreise des Übertragers endigen oben an zwei Standklemmen *Kl*, von denen die rechtsliegende in der Abbildung sichtbar ist.

Schaltung des Fritterkreises. Die Wellenströme, welche durch die Induktionswirkungen aus der primären Spule des Übertragers *Ue Sp* in der sekundären erzeugt werden, nehmen ihren Verlauf von den Klemmen *Kl* (siehe Fig. 110, wozu auch Fig. 109 zu vergleichen ist) durch den Draht 48, über eine Taste *t*, den Draht 49 und den Kontakt k_8 zum Fritter *Fr*. Von diesem führt ein für die Wechselströme gangbarer Weg über den Kontakt k_{10}, durch den Draht 50, den Kondensator 4, den Draht 51, den Kontakt k_9 und die Drähte 52 und 53 zur zweiten Klemme *Kl* der sekundären Übertragungsspule *Ue Sp* zurück. Wird nun der Fritter unter dem Einfluß der ankommenden Wellen leitend, so schließt er zugleich einen Weg für den Gleichstrom aus dem Fritterelement *Ef* über den Vorschaltwiderstand R_3, den Draht 50, den Kontakt k_{10}, durch den Fritter, den Kontakt k_8, die Drähte 49 und 48, die sekundäre Wickelung der Übertragungsspule *Ue Sp*, die Drähte 53 und 52, den Kontakt k_9, den Draht 54, den Kontakt k_{12}, den Draht 55, über das Relais und durch den Draht 56 zum Fritterelement *Ef* zurück. Nach der Herstellung dieses Stromkreises spricht das Relais an. Hierdurch werden die von der Ortsbatterie *OB* gespeisten Stromwege geschlossen. Es fließt ein Strom aus *OB* über den Vorschaltwiderstand R_4 durch die Drähte 57 und 58, den Morseapparat, die Drähte 59, 60, 61, den Kontakt k_7, den Draht 62, über den Arbeitskontakt des Relais, den Körper des Relais, die durch den Kontakt k_{11} verbundenen Drähte 63 zur Ortsbatterie *OB* zurück. Der Morseapparat spricht an. Gleichzeitig geht ein Zweigstrom über die Drähte 64 und 65 durch die Elektromagnetwindungen des Klopfers. Infolgedessen wird der Klopferanker angezogen, so daß der Klöppel auf den Fritter schlägt und ihn entfrittet. Bevor jedoch der Klöppel den Fritter trifft, wird der Relaisstromkreis durch die Bewegung des Klopferankers bei k_{12} unterbrochen. Hierdurch wird erstens verhütet, daß der Funke, welcher bei der Öffnung dieses Stromkreises entsteht, im Fritter selbst überspringt und die Metallkörnchen aneinanderschweißt, und zweitens wird erreicht, daß der Unterbrechungsfunke nur vor der Entfrittung auftreten kann; im anderen Falle würden die beim Ausgleich des Funkens auftretenden Schwingungen den Fritter von neuem erregen. Die Entstehung eines Unterbrechungsfunkens nach der Entfrittung ist jedoch auch an dem Arbeitskontakt des Relais möglich. Hier wird der Klopfer- und der Morsestromkreis nach der Entfrittung geöffnet. Beide Apparate besitzen Selbstinduktion; es kann daher ein Öffnungsfunke entstehen. Um dies zu verhüten, sind parallel zu den beiden genannten Apparaten mehrere Polarisationszellen *PZ* geschaltet.

Nach dem Ansprechen des Fritters wird also der Klopferanker einmal angezogen. Erfolgt hierdurch die Entfrittung ausnahmsweise nicht, so wird

beim Zurückgehen des Klopferankers das Relais bei k_{12} von neuem geschlossen und infolgedessen der Klopfer noch einmal in Tätigkeit versetzt. Nach der Entfrittung bleibt der Kontakt k_{12} dauernd geschlossen, so daß das Relais für den Empfang eines zweiten Stromes bereit ist. Dieser wird mit dem Einlangen des zweiten Wellenzuges im Fritter von dem Fritterelement entsendet. Da der Klopfer mit jedem Wellenzuge anspricht, hört man bei der Ankunft eines Striches den rasselnden Anschlag des Klopfers während der ganzen Dauer des Zeichens. Der Morseapparat ist weniger empfindlich; die Trägheit seines Hebels gestattet ihm nicht, den schnell aufeinanderfolgenden kurzen Stromstößen zu folgen; er zeichnet daher einen zusammenhängenden Strich auf.

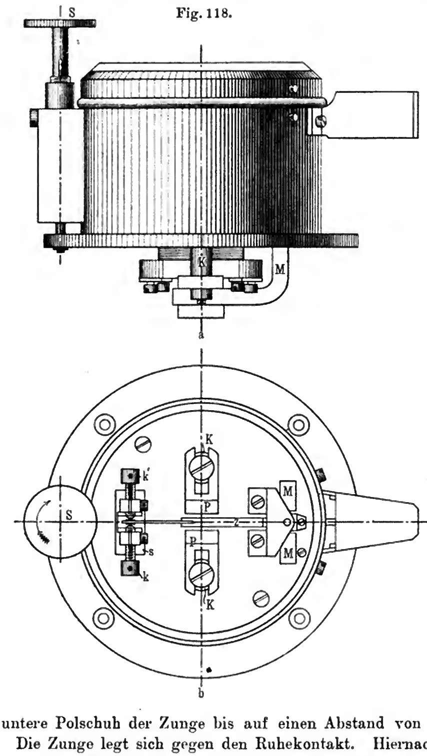
Die Apparate des Schreibempfängers. Die Abbildung des Schreibempfängers findet sich in Fig. 112 auf Tafel I. Auf der gemeinsamen Grundplatte steht im Vordergrunde der Morseapparat; dahinter befindet sich ein Holzkasten, in welchem die Ortsbatterie, einige Trockenelemente und das Fritterelement, sowie einige Nebenapparate enthalten sind. Als Fritterelement dient ein sehr kleines Trockenelement. Die Fritterbatterie darf nur geringe Spannung haben, damit sie nicht selbst den Fritter leitend macht. Auf dem Deckel des Kastens ist hinten links das Relais, daneben der Klopfer, dessen Klöppel von unten gegen den Fritter schlägt, und vorne rechts der Hebel H_1 befestigt. Dieser Hebel trägt den Fritter, der zwischen zwei Federpaare eingeklemmt ist und leicht ausgewechselt werden kann.

Das Empfangsrelais ist ein sehr empfindliches polarisiertes Relais. Seine Bauart ist aus Fig. 118 a und b (a. f. S.) zu ersehen. Fig. 118 a zeigt das Relais von der Seite, Fig. 118 b von oben. M ist ein rechtwinklig gebogener Dauermagnet. Der senkrecht stehende längere Schenkel ist am oberen Ende geschlitzt (Fig. 118 b), so daß er die Zunge z von beiden Seiten umfaßt, nur den nötigen Spielraum für ihre Bewegung lassend. Die Zunge besteht aus Eisen; sie wird daher unter dem Einfluß des Dauermagneten magnetisch. Der kurze Schenkel des Magneten trägt auf einem eisernen Querriegel zwei Elektromagnetrollen mit den eisernen Kernen K, die ebenfalls, jedoch im entgegengesetzten Sinne wie die Zunge des Relais, magnetisch sind. Die Zunge z wird daher von den Polschuhen P angezogen, die an den freien Enden der Kerne befestigt sind. Die Polschuhe P sind verschiebbar. Je nachdem sie der Zunge z mehr oder weniger genähert werden, wirkt die Anziehung des zugehörigen Elektromagnetkernes stärker oder schwächer. Durch passende Einstellung der Polschuhe ist es daher zu erreichen, daß die Zunge von beiden Kernen gleich stark angezogen wird. Die auf den Kernen sitzenden Rollen sind so hintereinander geschaltet, daß ein sie durchfließender Strom den Magnetismus in dem einen Kerne schwächt, in dem anderen aber verstärkt. Die Anziehungskraft des letzteren gewinnt dann das Übergewicht und zieht die Zunge an. Die Bewegung der Zunge ist durch die Kontaktschrauben k und k' begrenzt; k dient als Ruhekontakt, k' als Arbeitskontakt. Beide Schrauben sitzen auf einem Schlitten s, welcher mit Hilfe der Schraube S in der Richtung kk' verschoben werden kann. Da die Kontakte k und k' während des Betriebes sehr eng stehen, wird durch eine Verschiebung des

Schlittens die Zunge mitgenommen und so nach Bedarf dem einen oder dem anderen Polschuh P mehr genähert.

Die Einstellung des Relais geschieht folgendermaßen: Die Kontaktschrauben und die Polschuhe werden zunächst weit auseinandergeschraubt; dabei wird der Ruhekontakt ungefähr auf die Mitte eingestellt. Alsdann

Fig. 118.

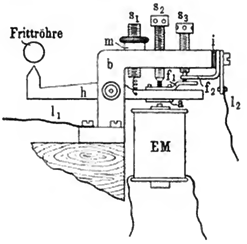


wird der untere Polschuh der Zunge bis auf einen Abstand von 1 bis 2 mm genähert. Die Zunge legt sich gegen den Ruhekontakt. Hiernach wird ihr auch der obere Polschuh vorsichtig so weit näher gebracht, bis die Zunge angezogen wird; er wird jedoch alsdann wieder langsam zurückgezogen und zwar so weit, bis die mit dem Finger an den Ruhekontakt zurückgeführte Zunge an diesem eben liegen bleibt. Jetzt wird auch der Arbeitskontakt k' so weit vorgeschraubt, daß er die Zunge berührt und danach wieder um so

viel zurückgesetzt, bis diese Berührung eben aufhört. Zur Prüfung seiner Empfindlichkeit wird das Relais mit Hilfe der in Fig. 110 auf Tafel I mit *t* bezeichneten Taste unter Strom gesetzt. Wird die Taste *t* gedrückt (in der Zeichnung nach rechts), so wird das Fritterelement *Ef* unter Ausschluß des Fritters über das Relais, den Unterbrechungskontakt am Klopfer, die Sekundärspule der Übertragungsrolle *Ue Sp* und einen Widerstand von 100000 Ohm geschlossen. Ist die Einstellung des Relais nicht so getroffen, daß es beim Druck der Taste *t* anspricht, so wird durch Rechtsdrehen der Schraube *S* der Schlitten *s* langsam dem Polschuh auf der Seite des Arbeitskontaktes genähert. Der Ruhekontakt nimmt hierbei die Zunge mit, bis sie angezogen wird. Je näher die Zunge durch die Schraube *k* jenem Polschuh gebracht wird, um so leichter wird sie angezogen, um so größer ist aber auch die Gefahr, daß sie nach dem Aufhören des Stromimpulses noch festgehalten wird (klebt). Um dem entgegenzuwirken, muß durch weiteres Hineindrehen der Kontaktschraube *k'* einer allzu großen Annäherung der Zunge an den Polschuh vorgebeugt werden. Je enger die Kontakte *k* und *k'* einander stehen, um so empfindlicher kann also das Relais eingestellt werden. Von dem Widerstand zu 100000 Ohm kann die Hälfte mit Hilfe eines Kippschalters t_1 (Fig. 110) überbrückt werden, so daß die Einstellung zunächst mit etwas stärkerem Strom erfolgen kann. Mit dem Ansprechen des Relais muß auch der Klopfer zu rasseln beginnen, im anderen Falle ist dessen Einstellung zu regulieren.

Der Klopfer ist in Fig. 119 dargestellt. Wenn der hufeisenförmige Elektromagnet *EM*, von dem nur ein Schenkel zu sehen ist (Seitenansicht), erregt wird, zieht er den Anker *a* und mit ihm den rechten Arm des Hebels *h* nach unten. Der Klöppel am linken Ende dieses Hebels wird dabei gegen den Fritter geschlagen. Gleichzeitig wird der Kontakt zwischen den Federn f_1 und f_2 (Kontakt k_{12} in den Figg. 109 und 110) gelöst und so der Relaisstromkreis unterbrochen. Die Achse des Hebels *h* ist in dem Metallbügel *b* gelagert, welcher die Regulierschrauben s_1, s_2 und s_3 trägt. Die Stellung von s_2 bestimmt den Abstand des Ankers *a* von dem Elektromagnetkerne; die Schraube s_1, welche mittels der Mutter *m* gehoben und gesenkt werden kann, reguliert die Spannung einer Abreißfeder. Diese beiden Schrauben dienen also dazu, den Klopfer so einzustellen, daß er auf den durch seinen Elektromagneten *EM* gehenden Strom sicher anspricht. Mit der Veränderung dieser Einstellung ändert sich auch die Lage der Feder f_1. Um den Kontakt zwischen f_1 und f_2 sicher zu stellen, ist f_2 mit Hilfe der Schraube s_3 zu regulieren. Die Feder f_2 ist gegen den Körper des Apparates durch die Hartgummizwischenlage *i* und eine Hornspitze an der Schraube s_3 isoliert. Die Leitung zum Fritter und zum Relais (Drähte 54 und 55 in Fig. 110 auf Tafel I) wird bei l_1 und l_2 angeschlossen; der Elektromagnet des Klopfers liegt an den Drähten 64 und 65 (Fig. 110).

Fig. 119.

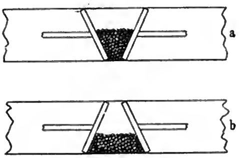


Betriebsvorschriften für die Empfangsstation. Um die Empfangsstation in Betrieb zu setzen, muß zunächst der Luftleiter auf die Länge der ankommenden Wellen abgestimmt werden, damit deren Wirkung durch Resonanz nach Möglichkeit erhöht wird. Die Abstimmung des Luftleiters beim Empfange kann nicht mittels der beschriebenen Wellenmesser erfolgen, denn die ankommenden Wellen sind zu schwach, um an den Wellenmessern sichtbare Wirkungen hervorzurufen. Für diesen Zweck werden die Empfangsapparate selbst benutzt; ihr mehr oder weniger kräftiges Ansprechen ist ein Maß für die Stärke der ankommenden Ströme.

Die Länge der ankommenden Wellen braucht mit derjenigen der von derselben Station beim Geben ausgesandten nicht übereinzustimmen; man wird sie in vielen Fällen daher nicht kennen.

Hat man keinerlei Anhalt zur Beurteilung der aufzufangenden Wellen, so ist die Abstimmung des Luftleiters nicht ganz leicht. Mit dem Hörempfänger läßt sie sich leichter ausführen, als mit dem Schreibempfänger. Um den Fernhörer zu benutzen, stellt man bei abgeschaltetem Luftleiter den Schleifkontakt an dem Widerstande R_2 (Fig. 110), durch welchen die auf die elektrische Zelle wirkende Spannung reguliert wird, so ein, daß das Rauschen im Fernhörer eben verschwindet. Alsdann legt man den Luftleiter mittels des Stöpsels s_8 an H_2 und verändert durch Regulieren am Kondensator 1 und an der Verlängerungsspule *Ve* die Kapazität und die Selbstinduktion so lange, bis die Lautstärke der ankommenden Zeichen einen Höchstwert erreicht hat. Auch die Selbstinduktion der primären Rolle der Übertragungsspule *Ue Sp* liegt im Luftleiter und wirkt auf dessen Eigenschwingung ein. Sie wird durch Versetzen des Stöpsels verändert. Wenn möglich, wird man diese Primärspule jedoch ganz einschalten, und nur durch Veränderung der Selbstinduktion in der Verlängerungsspule *Ve* regulieren, damit die Induktion auf den sekundären Kreis, den Fritterkreis, um so kräftiger wird. Gleichzeitig mit Kondensator 1 und *Ve* ist der parallel zur Zelle liegende Kondensator 2 zu verändern, weil auch er Einfluß auf die Stärke der die Zelle durchfließenden Ströme hat (vgl. S. 123).

Fig. 120.



Ist die Abstimmung beendet, so geht man daran, den Schreibempfänger in Tätigkeit zu setzen. Um zunächst die Dämpfung durch die elektrolytische Zelle, welche jetzt zum Zeichenempfang nicht benutzt wird, so gering wie möglich zu machen, vermehrt man die ihr parallel geschaltete Kapazität bis auf ihren Höchstwert, indem man durch die Stöpsel s_9 und s_{10} (Fig. 111 auf Tafel I) die Zusatzkondensatoren anschließt und den Kondensator 2 selbst auf seinen Höchstwert einstellt. Der Fritter erhält seine Ströme aus der Sekundärspule des Übertragers *Ue Sp*. Auf S. 125 ist bereits erläutert, welche Hilfsmittel zur Abstimmung des sekundären Übertragerkreises dienen. Mit einiger praktischer Erfahrung wird man bei der Abstimmung des Luftleiters schon aus der Einstellung des Kondensators 1 und der Verlängerungsspule *Ve* die Länge der ankommenden Wellen erkennen, so daß man sogleich die

richtige Sekundärspule *Sp S* einsetzt. Im anderen Falle muß man mehrere dieser Spulen ausprobieren. Die primäre Spule wird bei dieser Abstimmung zunächst ganz über die sekundäre gesenkt, so daß die Koppelung zwischen beiden sehr fest ist. Dementsprechend sind auch die induzierten Ströme kräftig; es bedarf unter Umständen gar nicht oder nur in beschränktem Maße ihrer Erhöhung durch Resonanz, so daß der Fritter anspricht, auch wenn der Gleithebel *Gl* des Kondensators 3 (Fig. 117 auf S. 125) die Resonanzlage noch nicht gefunden hat. Wir können diesen Hebel in verhältnismäßig weiten Grenzen verschieben, ohne daß der Fritter aufhört, anzusprechen. Heben wir die primäre Rolle, so werden, weil *Sp P* aus größerer Entfernung wirkt, die in *Sp S* induzierten Ströme schwächer. Sie bedürfen mehr wie vorher der Verstärkung durch Resonanz und wir müssen den Gleithebel *Gl* der Resonanzlage näher bringen als zuvor, um ein Zeichen im Fritter zu erhalten. Indem wir *Sp P* immer höher stellen, grenzen wir die Resonanzlage für den Hebel *Gl* immer enger ein, bis der Fritter nur noch bei einer ganz bestimmten Stellung dieses Hebels anspricht. Um die Gesamtwirkung zu verstärken, können wir natürlich die Primärspule nach Bedarf wieder senken.

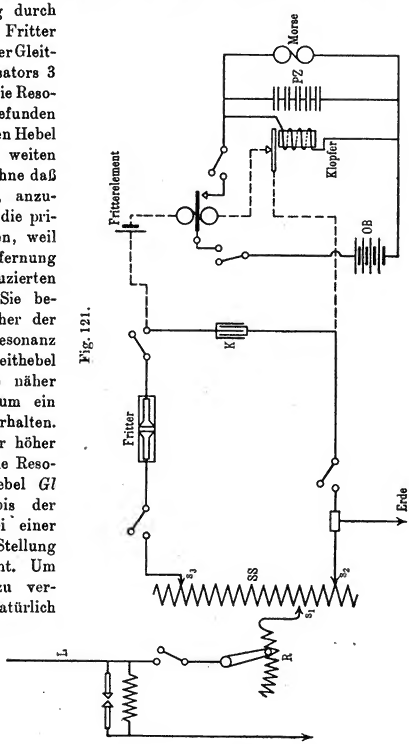


Fig. 121.

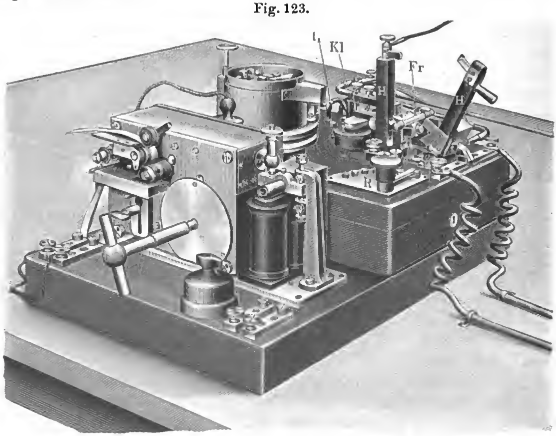
Die Empfindlichkeit des Fritters kann ebenfalls verändert werden. Seine Elektroden sind abgeschrägt, so daß ihr Abstand nicht an allen Punkten gleich groß ist. Durch Drehen der Frittröhre können die Elektroden in die Stellung der Fig. 120 a oder b oder in eine dazwischenliegende Stellung gebracht werden. In Fig. 120 a ist der von Metallpulver erfüllte Raum zwischen den Elektroden kürzer als in jeder anderen Lage. In diesem Falle genügt daher zur Erregung des Fritters eine geringere Spannung als sonst.

Um die **Betriebsfähigkeit** des Fritters und einzelner Stromwege zu prüfen, ist der Station ein Apparat zur Erzeugung schwacher elektrischer Wellen beigegeben. Dieser von der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie mit „**Lockklingel**“ bezeichnete Apparat besteht aus einem einfachen, von einem kleinen Trockenelement gespeisten Elektromagneten mit einem Selbstunterbrechungskontakt (**Wagner**schen Hammer). Die Funken, welche an der Unterbrechungsstelle auftreten, lösen Schwingungen aus, deren Quelle die Selbstinduktion und die Kapazität des Apparates selbst sind. Diese Schwingungen vermögen den Fritter in Tätigkeit zu versetzen. Der Apparat ist in ein handliches Holzkästchen eingebaut, auf dessen Deckel der Druckknopf einer Taste sitzt, durch welche das Element eingeschaltet wird.

Fig. 122.



Fig. 123.



Eine Empfangsstation mit Schiebespule und Fritter. Die Empfangsschaltung für eine Station anderer Art ist in Fig. 121 (a. v. S.) gegeben.

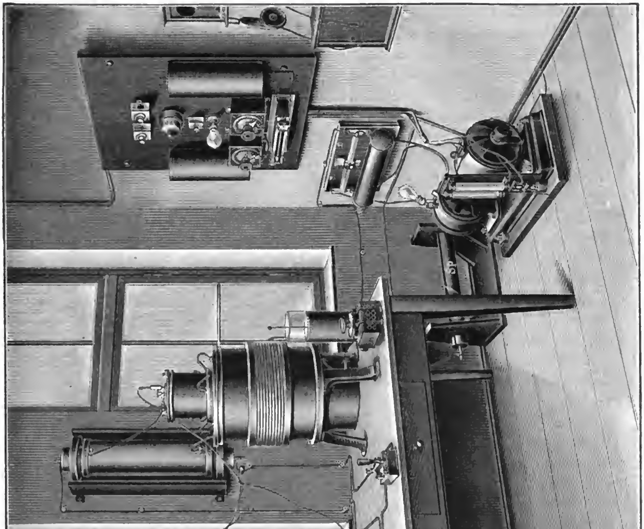
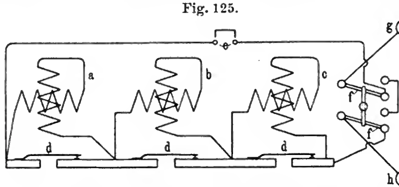


Fig. 124.

Sie enthält nur einen Schreibempfänger. Aus dem mit Blitzschutz versehenen Luftleiter L gelangen die Wellen über einen Widerstand R, der im Bedarfsfalle ihre Stärke vermindern soll, in eine Spule SS. Diese Spule, Schiebespule genannt (Fig. 122 a. S. 132), dient dazu, den Luftleiter auf die ankommenden Wellen abzustimmen und gleichzeitig den Fritterstromkreis mit dem Luftleiter in Resonanz zu bringen. Durch die Verschiebung der Kontakte s_1 und s_2 (Fig. 121) zueinander wird der im Luftleiter liegende Teil der Spule verändert, während die Stellung von s_2 zu s_3 die Wellenlänge des Fritterkreises bestimmt. Die übrige Schaltung ist dieselbe, wie in den Figg. 109 und 110. Das Empfangssystem zeigt Fig. 123 (a. S. 132). Vorne ist auch hier der Morseapparat zu sehen. Der Hebel H, welcher den Fritter Fr trägt und die verschiedenen, in Fig. 121 durch besondere Schalter dargestellten Kontakte schließt, ist etwas anders geformt als in Fig. 112 auf Tafel I. Wir sehen ferner den Schwächungswiderstand R, das Relais, die Taste t zur Prüfung des Relais und den Klopfer abgebildet. Fig. 124 (a. v. S.) gibt eine Gesamtansicht der inneren Einrichtung dieser Station. Das Erregergestell stimmt genau mit demjenigen der vorher beschriebenen Station überein. Der Resonanzinduktor ist auch hier an der Wand befestigt; er wird jedoch nur mit Wechselstrom gespeist. Zu dessen Erzeugung dienen die auf dem Fußboden sichtbaren Maschinen, zu welchen das Schaltbrett mit den Anlaß- und Regulierwiderständen, den Schaltern und Sicherungen rechts an der Wand gehört. Durch den Gleichstrom einer elektrischen Zentrale wird ein Motor angetrieben, mit dessen Welle eine auf demselben Grundbrett montierte Wechselstromdynamomaschine direkt gekoppelt ist. Zwischen die Wechselstrommaschine und die primäre Wickelung des Induktors ist die Spule Sp geschaltet (vgl. S. 99). Neben dem Erregergestell steht der Anlasser für den Motor. Dahinter ist eine Leydener Flasche zu sehen. Diese ist in den Luftleiter eingeschaltet, um seine Eigenschwingung zu verkürzen (vgl. S. 110); der Luftleiter dieser Station ist so lang, daß es einer Verlängerungsspule in der Senderanordnung nicht bedarf.

Das dreifache Variometer von C. Lorenz, A.-G. Zur Verwendung an Stelle der oben beschriebenen Schiebespule oder der früher erwähnten Verlängerungsspulen für die Abstimmung von Luftleitern hat die Aktiengesell-

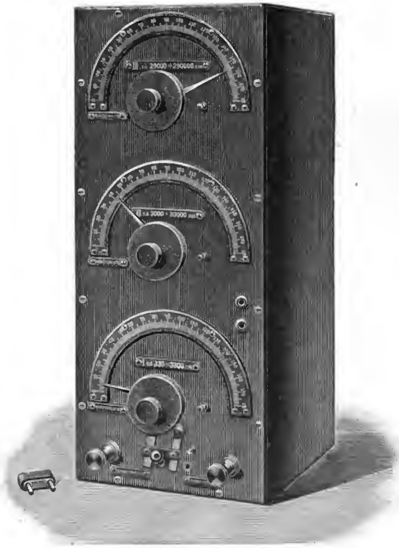
Fig. 125.



schaft C. Lorenz in Berlin veränderliche Selbstinduktionsspulen gebaut, die ähnlich eingerichtet sind, wie diejenige des Seibtschen Wellenmessers (vgl. S. 70). Sie bestehen aus zwei ineinander verdrehbaren, hintereinander vom Strom durchflossenen Spulen, deren Magnetfelder sich je nach ihrer gegen-

seitigen Stellung aufheben oder verstärken. Im gleichen Sinne ändert sich mit einer Drehung der Spulen ihre gesamte Selbstinduktion. Das Variometer enthält, wie die schematische Stromlaufzeichnung in Fig. 125 und die Abbildung des Apparates in Fig. 126 zeigen, drei solcher Spulenpaare *a*, *b* und *c* (Fig. 125), deren Achsen mit Kurzschlußschaltern *d* verbunden sind. Diese werden bei der mit Kurzschluß bezeichneten Zeigerstellung (Fig. 126) geschlossen. Bei *e* (Fig. 125) kann mit Hilfe zweier Stöpsellöcher noch eine

Fig. 126.



Selbstinduktionsrolle zur Verlängerung der Welle eingeschaltet werden. Ist dies nicht erforderlich, so überbrückt man die beiden Stöpsellöcher durch einen Kurzschlußstöpsel. Bei *ff* ist ein doppelpoliger Kurbelumschalter angeordnet, welcher es ermöglicht, das Variometer zwischen die zum Anschluß der Antenne und der Erde oder des Gegengewichts bestimmten Klemmen *g* und *h* zu schalten, oder das Variometer ganz auszuschalten und dafür die Klemmen *g* und *h* unmittelbar miteinander zu verbinden.

XXII. Stationen mit großer Reichweite.

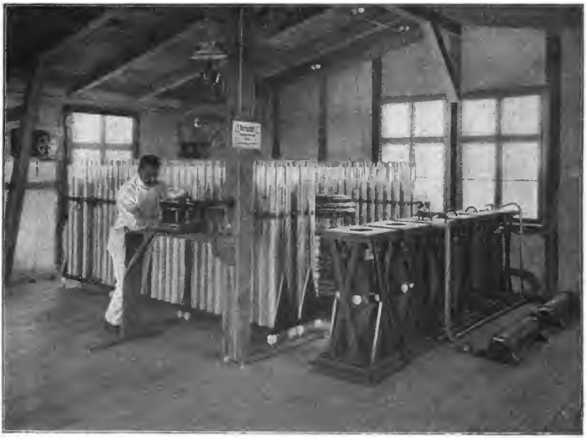
Allgemeine Anordnung. Von der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie, System Telefunken, in Berlin ist bei Nauen, an der Berlin—Hamburger Eisenbahn, eine Station mit großer Reichweite errichtet worden, die als eine

Musteranstalt dieser Art gelten kann. Sie ist für den Verkehr bis zu Entfernungen von mehreren tausend Kilometern bestimmt [1]).

Zur Hochführung des Luftleiters ist ein eiserner Turm von 100 m Höhe errichtet. An dessen Fuß liegt das Stationshaus, mitten unter dem sich weit ausbreitenden Leiternetz der Antenne. Das Stationshaus hat zwei Stockwerke. Im Erdgeschoß ist der Maschinenraum, der Telegraphierraum und der Empfangsraum untergebracht, während der obere Stock als Hochspannungsraum benutzt wird.

Die Räume werden im Bedarfsfalle mittels des Abdampfes einer zum Antrieb der Dynamomaschinen bestimmten Lokomobile geheizt, die in einem angebauten Schuppen untergebracht ist.

Fig. 127.



Die Einrichtung des Senders. Die Sendereinrichtung ist nicht wesentlich anders angeordnet, als die, welche wir aus dem vorigen Abschnitt schon kennen. Der Luftleiter ist mit einem geschlossenen Schwingungskreise gekoppelt, der durch Induktoren aufgeladen wird. Die gewaltigen Energiemengen, die zur Überwindung der großen Entfernungen notwendig sind, bedingen jedoch in dem Aufbau der Station und in der Konstruktion der Apparate gegenüber den früher betrachteten eine Reihe von Abweichungen. Was bei den kleineren Stationen in dem Erregergestell vereinigt ist, beansprucht hier das ganze obere Stockwerk des Stationshauses, einen Raum von etwa 100 qm Fläche, von dem Fig. 127 ein Bild gibt.

---

[1]) Siewert, E. T. Z. 1906, S. 965.

Dort sind 360 mannshohe Leydener Flaschen in acht Reihen aufgestellt und in drei hintereinander geschaltete Gruppen eingeteilt, von denen jede 120 Flaschen in Parallelschaltung enthält. Die gesamte Kapazität dieser Flaschenbatterie beträgt 400 000 cm. Als Selbstinduktion dient eine Spule aus starkem, versilbertem Kupferrohr, das in Schraubenlinien geführt und an Porzellanisolatoren aufgehängt ist. Verstellbare Anschlußkontakte gestatten, sowohl die Wellenlänge, wie den Koppelungsgrad mit dem Luftleiter zu ändern. Die Funkenstrecke ist nicht unterteilt, denn die Funkendämpfung ist nur gering bei der bedeutenden Stromstärke von rund 400 000 Amp., welche beim Einsetzen der Schwingungen entsteht. In einem Abstande von etwa 30 mm stehen sich zwei ringförmige Elektroden von 500 mm äußerem Durchmesser gegenüber.

In Fig. 127 sieht man links die große Flaschenbatterie, und in der Mitte, zwischen den Flaschen auf einem Gestell, das unten die Selbstinduktionsspule trägt, die Elektroden der Funkenstrecke.

Fig. 128 (a. f. S.) gibt das Schaltungsschema der Anlage, in welchem der Stromlauf des Sendekreises rechts oben durch dicke Linien gekennzeichnet ist. Zur Aufladung der Leydener Flaschen sind die sekundären Wickelungen von vier Resonanzinduktoren parallel geschaltet, damit sie kräftige Ströme abzugeben vermögen. Die Primärwickelungen der Induktoren sind hintereinander verbunden und über die Primärwickelungen von zwei Drosselspulen an eine Dynamomaschine angeschlossen, welche Wechselstrom von 50 Perioden liefert. Die sekundären Wickelungen der Drosselspulen liegen vor dem Erregerkreise; sie sind so abgestimmt, daß der Erregerkreis sowie sie selbst und die sekundären Wickelungen der Induktoren sich mit der Periodenzahl des Maschinenstromes in scharfer Resonanz befinden, so daß eine verhältnismäßig geringe Energiezufuhr zur Ladung der großen Flaschenbatterie genügt. Fig. 127 zeigt rechts die vier Induktoren und die beiden Drosselspulen nebeneinander aufgestellt.

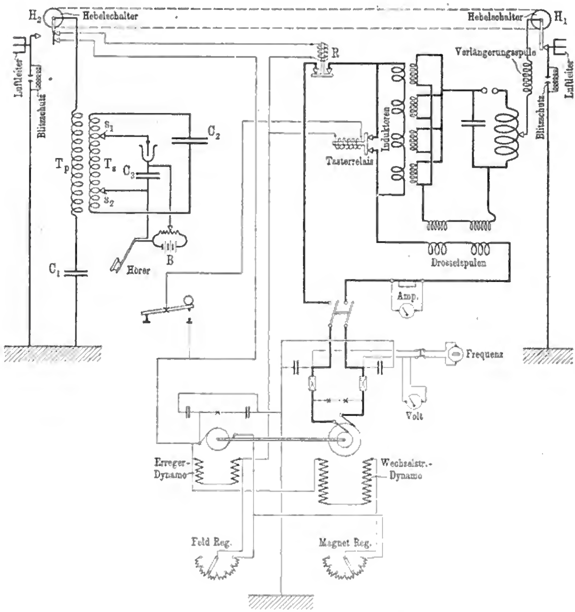
Zum Senderkreise gehört ferner das Tasterrelais, das zur Abgabe der Telegraphierzeichen dient. Es geht nicht an, den Primärstrom wie bei den früher betrachteten Stationen durch eine Taste unmittelbar schließen und öffnen zu lassen, denn er ist bei dieser großen Anlage zu stark; die an der Taste sich bildenden Funken würden die Kontakte verbrennen und unbrauchbar machen. Die Einrichtung ist deshalb so getroffen, daß eine Unterbrechung des von der Wechselstromdynamo gelieferten Primärstromes überhaupt nicht eintritt. Der Anker des Tasterrelais überbrückt in der Ruhelage die primären Wickelungen der Induktoren, so daß der Maschinenstrom nur über die Drosselspulen geschlossen ist. Das Relais ist mit der in Fig. 128 links sichtbaren, zur Zeichengebung bestimmten Taste in Arbeitsstromschaltung verbunden. Bei Tastendruck wird das Relais von einem verhältnismäßig schwachen Gleichstrom durchflossen, es zieht seinen Anker an und öffnet somit dem Maschinenstrom den Zutritt in den Primärkreis der Induktoren. Die hierbei auftretende Stromänderung ist so gering, daß das Tasterrelais fast funkenlos arbeitet.

In der Zuführung zum Luftleiter liegt eine Verlängerungsspule.

Die Verblockung der Stromkreise. Links gegenüber der Sendeeinrichtung ist in Fig. 128 mit den mittelstarken Linien die Empfangsschal-

tung gezeichnet. Um die empfindlichen Apparate des Empfängers vor Beschädigungen durch die kräftigen, vom Sender ausgehenden Wellen zu schützen, sind die beiden Stromkreise ähnlich wie bei den kleineren Stationen gegeneinander verblockt. Diesem Zweck dienen die rechts und links oben sichtbaren einarmigen Hebelschalter H_1 und H_2 und das Relais R. Der Schalter H_1 befindet sich im Hochspannungsraum, H_2 einen Stock tiefer im Telegraphierzimmer. Beide sind durch ein Kettengetriebe zwangläufig so ver-

Fig. 128.



bunden, daß sie sich stets gleichzeitig und in demselben Sinne bewegen müssen. In Fig. 128 ist diese Kettenverbindung durch die über zwei Scheiben laufende gestrichelte Linie angedeutet; in Fig. 127 auf S. 136 sind an der linken Wand die Ketten sowie rechts und links vom Fenster die Übertragungsräder für die Schaltvorrichtung zu sehen. Vom Empfangssystem sowohl wie vom Senderkreise führen Zuleitungen zur Antenne; sie sind in Fig. 128 rechts und links oben angedeutet. Stehen die Hebel H_1 und H_2 senkrecht nach unten, so liegt die Antenne am Senderkreise. Gleichzeitig ist sie von den Empfangsapparaten abgeschaltet. Bei dieser Hebellage können die aus-

gesandten Wellen den Empfänger der eigenen Station nicht erreichen. Werden H_1 und H_2 nach links geschaltet, so wird die Antenne vom Sender getrennt und mit dem Empfänger verbunden. Gleichzeitig wird ein bis dahin durch den Hebel H_2 geschlossener Stromkreis geöffnet, in welchem das Relais R liegt. Dieser Kreis, dem bei der senkrechten Stellung des Hebels H_2 von der später zu besprechenden Erregerdynamo Gleichstrom zufließt, wird nunmehr stromlos; der Anker des Relais R fällt ab und öffnet den Primärkreis der Induktoren. Solange die Hebel H_1 und H_2 auf Empfang stehen, ist es daher nicht möglich, die Induktoren in Tätigkeit zu setzen. Die Hebelschalter werden vom Telegraphierzimmer aus gesteuert.

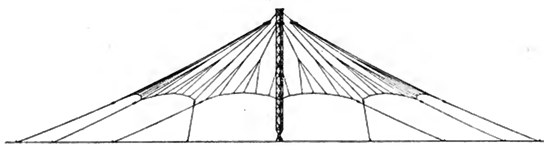
Die Empfangseinrichtung. Die Empfangsapparate weichen von denjenigen der kleineren Stationen nur wenig ab; ihre Schaltung ist jedoch etwas verändert. Wie die Fig. 128 zeigt, ist ein geschlossener Schwingungskreis, der die elektrolytische Zelle enthält, mit dem Luftleiter durch eine reine Transformatorschaltung verbunden. Infolge dieser ziemlich losen Koppelung ist zwar die Energieaufnahme des sekundären Kreises geringer, als bei der direkten Schaltung, welche in einer der früher auf S. 120 behandelten Stationen angewendet wurde. Da jedoch lose gekoppelte Schwingungssysteme schärfer aufeinander abgestimmt werden können, besitzt die Anordnung der großen Station vor einem fester gekoppelten System den praktischen Vorteil, daß sie weniger leicht auf solche Wellen anspricht, deren Länge von derjenigen abweicht, auf welche das Empfangssystem gerade abgestimmt ist. Sie ist daher vor Störungen durch fremde, nicht für sie bestimmte Wellen mehr als bei festerer Koppelung geschützt. Ferner ist die Möglichkeit gegeben, den Empfänger auch auf die beiden von einem gekoppelten Sendersystem ausgesandten Wellen abzustimmen und dadurch die Telegraphierweite zu erhöhen. Parallel zu der elektrolytischen Zelle wird den auf S. 123 gegebenen Erörterungen entsprechend eine Selbstinduktion geschaltet. Zu diesem Zweck ist ein Teil der sekundären Transformatorwickelung verwendet, dessen Wert mit Hilfe der verschiebbaren Kontakte s_1 und s_2 (Fig. 128) verändert werden kann. Zum Abstimmen des geschlossenen Kreises dient außer den verstellbaren Kontakten s_1 und s_2 der Kondensator C_2. Der Erdkondensator C_1 wirkt auf die Eigenschwingung des Luftleiters; C_3 ist ein Blockierungskondensator, welcher dem aus der Batterie B kommenden Strome den Weg versperrt, die ankommenden Wellen aber nicht aufhält.

Die Anordnung der Maschinen. Der untere Teil der Fig. 128 zeigt die Schaltung der zur Erzeugung der elektrischen Energie aufgestellten Maschinen. Die Wechselstromdynamomaschine, welche Strom von 50 Perioden liefert, wird von der auf S. 136 bereits erwähnten Dampflokomobile von 35 PS angetrieben. Auf derselben Welle der Wechselstrommaschine sitzt eine Gleichstrommaschine. Diese, eine Nebenschlußdynamo, deren Spannung mit dem vor den Feldmagneten liegenden Widerstand reguliert wird, liefert den Strom zur Erregung des Magnetfeldes der Wechselstrommaschine sowie zur Speisung des Relais R und des Tasterrelais. Der primäre Induktorkreis wird durch einen doppelpoligen Ausschalter an die Wechselstrommaschine angeschlossen. Er enthält einen Stromzeiger (Amp. in Fig. 128) zur Über-

wachung der Stromstärke, welche mit der Spannung durch die Veränderung der Feldstärke reguliert wird. Hierzu dient der in Fig. 128 gezeichnete Magnet-Regulierwiderstand. Parallel zur Wechselstrommaschine liegt ein Spannungs- und ein Frequenzmesser. Die Beobachtung des letzteren ist besonders wichtig, damit nicht die Resonanz des Maschinenstromes mit dem Erregerkreise verloren geht.

Die Antenne ist ein schirmförmiges Drahtgebilde, wie es in Fig. 129 dargestellt ist. Es sind 100 Drähte an dem eisernen Turm vom Stationshause aus 100 m hoch geführt und von dort wie die Stäbe eines Schirmgestelles nach allen Seiten ausgebreitet. Dabei verzweigen sich die einzelnen Drähte noch mehrmals. Sie überspannen einen Kreis von 400 m Durchmesser und etwa 60 000 qm Fläche. Die Enden sind gegen die Erde durch Hanfschnüre und mehrere hintereinander geschaltete Porzellanisolatoren isoliert; mit dem eisernen Turm steht die Antenne jedoch in leitender Verbindung. Der Querschnitt des Turmes bildet ein Dreieck von 4 m Seitenlänge. Die drei senkrechten Seitenstreben vereinigen sich unten in einer großen Stahlkugel, welche beweglich auf einem gegen die Erde gut isolierten Lager ruht.

Fig. 129.



Drei starke, weit ausladende Anker, welche in 75 m Höhe angreifen, im Verein mit dem ebenfalls gut verankerten Luftleiternetz, halten den Turm in der senkrechten Stellung. Um eine gut leitende Erdverbindung zu schaffen, sind vom Stationshause aus 108 eiserne Drähte strahlenförmig in die Erde verlegt und der Anordnung des Luftnetzes entsprechend gabelförmig verzweigt worden. Die 0,25 m tief eingepflügten Drähte verteilen sich über eine Fläche von 126 000 qm.

Die Großstation in Nauen wird mit einer gleichartigen Gegenstation auf eine Entfernung von 4000 km arbeiten können.

XXIII. Fahrbare und tragbare Stationen.

Allgemeines. Die weitaus größte Zahl der zurzeit auf der Erde vorhandenen Stationen für elektrische Wellentelegraphie ist im Interesse der Seeschiffahrt angelegt worden. Es liegt dies nicht allein daran, daß über das Meer meist bessere Erfolge mit der drahtlosen Telegraphie erzielt worden sind, als über Land, sondern es entspricht auch einem lebhaften Verkehrsbedürfnisse, den auf hoher See befindlichen Schiffen, seien es Handels- oder Kriegsschiffe, eine gesicherte telegraphische Verbindung untereinander und mit dem Festlande zu verschaffen. Die auf den Seeschiffen eingerichteten

Anstalten sind Stationen, welche in ihren Grundzügen der Beschreibung entsprechen, die in den vorhergehenden Abschnitten von feststehenden Land- oder Küstenstationen gegeben worden sind.

Außerordentlich wichtige Dienste, vornehmlich für militärische Zwecke, leisten auch fahrbare oder tragbare Stationen für drahtlose Telegraphie zu Lande. Den in einem weit ausgedehnten und wenig übersichtlichen Gelände zerstreuten Truppen wird durch sie die Möglichkeit geboten, fast von jedem Standort aus in verhältnismäßig kurzer Zeit in einen Nachrichtenaustausch zu treten, der von keiner leicht der Zerstörung ausgesetzten Drahtverbindung abhängt. In voller Erkenntnis der Wichtigkeit solcher beweglichen Stationen für elektrische Wellentelegraphie haben fast alle Staaten ihre Truppen damit ausgerüstet. Bei vielen sind die von der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie in Berlin nach dem System Telefunken hergestellten fahrbaren und tragbaren Stationen eingeführt worden.

Ein Haupterfordernis für die Kriegsbrauchbarkeit ist die leichte Beweglichkeit der Stationen, damit sie den Truppen überall hin folgen können. Die Apparate müssen einfach, leicht, handlich, dauerhaft und so angeordnet sein, daß sie mit wenigen Handgriffen schnell und sicher in Betrieb gesetzt werden können. Durch Regulieren und Abstimmen darf nicht viel Zeit verloren gehen. Die Sende- und Empfangssysteme sind daher entweder ein für allemal auf eine bestimmte Wellenlänge eingestellt oder die Einstellung für die verschieden auszuwählenden Wellenlängen ist auf den zur Abstimmung bestimmten Spulen und Kondensatoren leicht erkennbar bezeichnet, so daß Meßinstrumente für die Abstimmung nicht erforderlich sind.

Als Luftleiter dient für vorübergehenden Gebrauch ein Draht oder ein mehrlitziges Kabel, welche bei ruhigem Wetter von einem Luftballon, bei ausreichendem Winde von einem Drachen emporgehoben werden. Ist anzunehmen, daß die Station längere Zeit an demselben Orte verbleiben wird, so pflegt ein fester Mast aus Magnaliumrohr mit einer Schirmantenne verwendet zu werden. Statt einer Erdleitung wird ein Gegengewicht angeschlossen.

Die fahrbaren Stationen dienen zum Verkehr auf Entfernungen von 50 bis 250 km. Das Stromlaufschema des Senders entspricht der Schaltung des nach Fig. 82 auf S. 89 gekoppelten Systems. Empfangen wird mit Hör- und mit Schreibempfängern, welche ähnlich wie in der auf S. 120 ff. beschriebenen Station angeordnet, jedoch induktiv an den Luftleiter angeschlossen sind.

Die Länge der ausgesandten Wellen beträgt bei der Verwendung des 250 m langen Luftkabels mit Drachen oder Ballon und einem Gegengewicht von 36 qm Kupfergaze etwa 850 m. Wird die feste Schirmantenne an einem 30 m hohen Mast benutzt, so läßt sich die Wellenlänge zwischen 250 und 1150 m dadurch verändern, daß Verlängerungsspulen oder Verkürzungskondensatoren in die Zuführungen zum Luftleiter bzw. zum Gegengewicht eingeschaltet werden. Die Reichweite beträgt alsdann je nach der Wellenlänge 50 bis 100 km für den Schreiber und 75 bis 150 km für den Hörer, wogegen das Luftkabel auf 150 km mit dem Schreiber und auf 250 km mit dem Hörer zu telegraphieren gestattet. Da aber die Kapazität des einfachen Luftkabels, besonders weil seine Lage zur Erde sich jeweils mit der Stellung des Drachens

oder des Ballons ändert, nicht ebenso konstant ist, wie diejenige der Schirmantenne, so kann mit dieser letzteren eine wesentlich genauere Abstimmung erzielt werden. Störungen durch fremde Stationen machen sich bei der Verwendung des Mastes erst bei einem Wellenunterschiede bis zu 10 Proz. be-

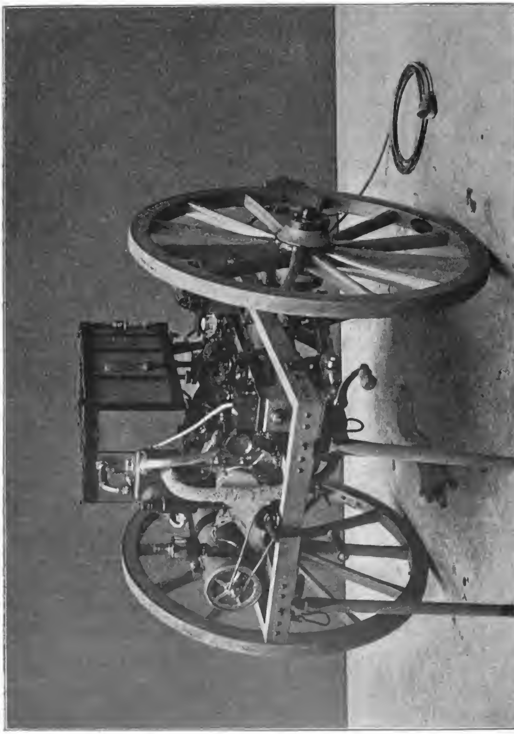


Fig. 130.

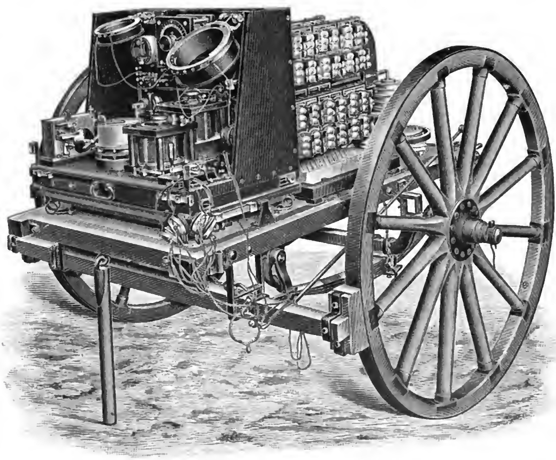
merkbar, während der einfache Luftleiter noch auf Wellen anspricht, die bis zu 50 Proz. von der eigenen abweichen.

Das gesamte Zubehör einer fahrbaren Station wird auf vier zweiräderige Karren verladen, die entweder einzeln bespannt und gefahren oder zu zwei vierräderigen Wagen verbunden werden. Im letzteren Falle enthält der Wagen I vorne den Gerätekarren, hinten den Apparatkarren, der Wagen II vorne den Mastkarren und hinten den Motorkarren.

Der Motorkarren ist in Fig. 130 abgebildet. Er enthält als Kraftquelle einen vierpferdigen Benzinmotor, der mit einem sechspoligen Wechselstromgenerator (6,8 Amp. und 110 Volt bei 1000 Touren) und einer zu diesem gehörigen Gleichstrom-Erregerdynamo (4 Amp. und 18 Volt) direkt gekoppelt ist. Ein Schaltbrett, die Sicherungen, ein Spannungsmesser, Werkzeuge und sonstiges Zubehör vervollständigen die Ausrüstung des Karrens. Die höchste Leistung der Maschine ergibt 15 mm Funkenlänge. Ein Kabel leitet den Strom vom Motorkarren zum Apparatkarren.

Den Apparatkarren zeigt Fig. 131. Die Sendeapparate sind auf der rechten Seite zusammengestellt. Man sieht in dem Bilde die Flaschenbatterie, die aus zwei hintereinander verbundenen Gruppen zu je 72 parallel ge-

Fig. 131.



schalteten Flaschen mit einer Gesamtkapazität von 16 000 cm besteht und die Funkenstrecke mit großen, pilzförmigen Elektroden. Nicht sichtbar ist die Selbstinduktionsspule, die neben den Leydener Flaschen untergebracht ist, sowie der zur Speisung des Schwingungskreises vorhandene Resonanzinduktor. Die Selbstinduktion gestattet, die Wellenlänge des Erregerkreises durch Stöpselung beliebig zwischen 200 und 1200 m zu wählen.

Auf der linken Seite des Karrens sind die Empfangsapparate und die Taste auf einem federnd gelagerten und herausziehbaren Tische vereinigt. Die Übertragungsrollen zur Anschaltung der Schlömilch-Zelle und des Fritterkreises an den Luftleiter sind der auf S. 125 beschriebenen ähnlich konstruiert. In der Fig. 131 sind sie oben rechts und links an dem pultartigen Aufsatz des Tisches zu sehen. Die primären Wickelungen dieser

Transformatoren liegen hintereinander im Luftleiter, so daß beide Empfänger gleichzeitig arbeiten. Die sekundären Spulen sind auswechselbar, um die Eigenschwingung der Empfangssysteme verändern zu können. Je drei Ersatzspulen gestatten im Verein mit den im Empfangskreise liegenden veränderlichen Kondensatoren eine Variation der Wellenlänge zwischen 200 und 1200 m. Durch Heben oder Senken der primären Transformatorspulen kann die Koppelung loser oder fester gemacht und dementsprechend die Abstimmschärfe und die Energieaufnahme (vgl. S. 88) geregelt werden.

Fig. 132.



Ein Universalschalter schließt alle Empfangsstromkreise und blockiert gleichzeitig den Sender oder umgekehrt.

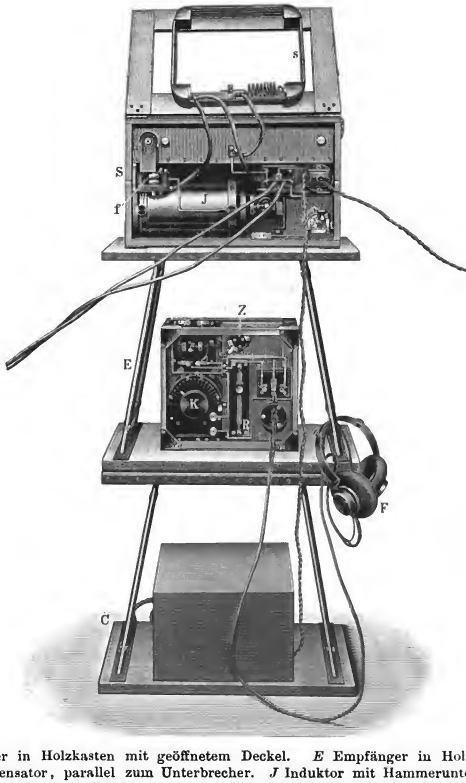
In dem Mastkarren und dem Gerätekarren werden die Teile des Mastes, 16 Rohre von annähernd 2 m Länge, das Luftleiternetz, das Gegengewicht, eine Anzahl von Drachen, der Ballon, Gasflaschen zur Füllung des Ballons, Benzinbehälter, Verlängerungsspulen, Verkürzungskondensatoren, Ersatzstücke, Werkzeuge u. dgl. m. mitgeführt.

Das Gewicht und die Abmessungen der Karren sind so gewählt, daß ein ganzer Wagen ungefähr einem Feldgeschütz entspricht.

Die tragbaren Stationen für elektrische Wellentelegraphie sind dazu bestimmt, von den Truppen dorthin mitgeführt zu werden, wohin Fahrzeuge

nicht mehr folgen können. Sie müssen deshalb noch etwas leichter und einfacher konstruiert sein, als die fahrbaren Stationen.

Fig. 133.



S Sender in Holzkasten mit geöffnetem Deckel. *E* Empfänger in Holzrahmen. *C* Kondensator, parallel zum Unterbrecher. *J* Induktor mit Hammerunterbrecher (rechts). *t* Taste. *f* Funkenstrecke. *s* Selbstinduktion des Erregerkreises. *c* Zuführung zur Kapazität. *Z* Schlömilch-Zelle. *R* Veränderlicher Widerstand (Spannungsregler für die Zelle). *K* Veränderlicher Kondensator. *F* Hörer.

Der Luftleiter besteht aus einem 100 m langen einfachen Drahte, den ein Drachen emporhebt, oder aus einem 15 m hohen Magnaliummaste mit einem Schirmnetze aus sechs Bronzelitzen zu je 25 m. Als Gegengewicht

dienen sechs, 1 m über der Erde am Mast isoliert angebrachte 40 m lange Drähte, die unterhalb der Luftdrähte ausgespannt werden.

Der Induktor wird mit Gleichstrom und Hammerunterbrecher gespeist. Zur Erzeugung des Gleichstromes wird eine kleine Nebenschlußdynamomaschine für 1 Amp. und 45 Volt mitgeführt. Ihr Antrieb erfolgt mittels des in Fig. 132 auf S. 144 abgebildeten Tretgestelles, das ähnlich wie ein Fahrrad gebaut ist und von einem Manne bedient werden kann. Für den Transport wird das Gestell zusammengelegt.

Die Schaltung des Gebers ist die bekannte Koppelung eines geschlossenen Schwingungskreises mit dem Luftleiter und dem Gegengewicht. Das Empfangssystem, eine Schlömilch-Zelle mit Hörer, ist induktiv durch einen Transformator mit dem Luftleiter verbunden.

Die Sendeapparate sind in einem Holzkasten, die Empfangsapparate in einem Holzgestell vereinigt; sie werden getragen je in einen Ledertornister verpackt. Für den Betrieb werden sie mit Hilfe von zwei kleinen aufeinandergesetzten Tischen, die gegebenenfalls auch als Stühle dienen können, in der aus Fig. 133 (a. v. S.) ersichtlichen Weise aufgestellt. Auf der obersten Tischplatte steht der Sender, auf der mittleren der Empfänger, auf der untersten ein Kondensator, der parallel zu den Unterbrechungskontakten des Hammerunterbrechers geschaltet ist. Auf dem Marsche werden gewöhnlich zwei tragbare Stationen mit einer Betriebsreserve in einen Karren verladen. Eine dieser Stationen ist im Bedarfsfalle dafür bestimmt, beim Befehlshaber eines größeren Verbandes aufgestellt zu werden, während die andere einen vorgeschobenen Truppenteil begleitet. Besteht dieser aus Kavallerie, so werden die Zubehörteile auf vier Tragtiere verteilt. Zur Fortschaffung zu Fuß gehören zehn Mann. Hierzu werden aus den acht Rohrteilen des Mastes vier Tragbahren hergerichtet, die von je zwei Mann getragen werden. Die beiden übrigen Leute befördern die Tornister mit dem Sender und dem Empfänger.

Eine solche tragbare Station arbeitet mit einer festen Wellenlänge von 364 m auf 30 bis 50 km.

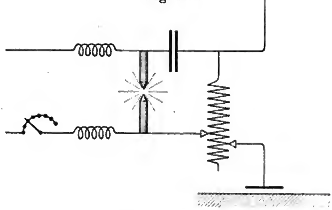
Da die fahrbaren Stationen Wellen von 360 m senden und empfangen können, vermögen sie mit den tragbaren zu verkehren.

XXIV. Die technische Anwendung der ungedämpften Schwingungen zur drahtlosen Telegraphie.

Das System Poulsen. Valdemar Poulsen erzeugt die ungedämpften Schwingungen, wie auf S. 94 erwähnt, mit Hilfe einer Bogenlampe, die in Wasserstoff brennt und sich in einem magnetischen Felde befindet. Die negative Elektrode dieser Lampe besteht aus Kohle, die positive entweder auch aus Kohle oder aus einem kupfernen Zylinder, der hohl gearbeitet ist, damit er durch Wasser gekühlt werden kann. Besonderer Wert wird darauf gelegt, daß die Ränder der Elektroden, von denen der Lichtbogen ausgeht, stets scharf abgeschliffen sind. Hierdurch wird die Abschwächung des Lichtbogens und somit die Abkühlung der heißen Dämpfe bei einer Verminderung des Lampenstromes begünstigt.

Der Sender. Mit dem Schwingungskreise wird nach der in Fig. 134 gegebenen Schaltung ein offener Oszillator gekoppelt, welcher infolge der ununterbrochenen Erregung ungedämpfte Wellen nach allen Richtungen hin ausstrahlt. Statt der Erdverbindung verwendet Poulsen ein Gegengewicht. Durch die Verschiebung der Kontakte auf der Selbstinduktionsspule kann sowohl die Wellenlänge als auch der Koppelungsgrad verändert werden. In die Speiseleitungen der Lampe sind außer einem Widerstande zur Regulierung der Stromstärke Spulen mit Selbstinduktion (Drosselspulen) eingeschaltet, welche so hohe Induktanz besitzen, daß der Ausgleich der schnellen Schwingungen über die Stromquelle verhindert wird.

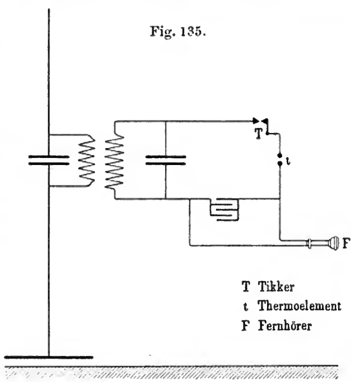
Fig. 134.



Um Zeichen zu entsenden, kann in verschiedener Weise verfahren werden. Entweder wird der Luftleiter und das Gegengewicht, die für gewöhnlich von dem ununterbrochen schwingenden Lampenkreise getrennt sind, durch eine Morsetaste daran an- und davon abgeschaltet, oder es wird ebenfalls mittels einer Morsetaste im Kondensatorkreise oder im Luftleiter ein Widerstand aus- oder eingeschaltet. Dieser Widerstand, der beim Tastendrucke kurz geschlossen wird, ist so groß zu bemessen, daß er bei ruhender Korrespondenz und in den Zwischenpausen zwischen den Zeichenelementen das Auftreten der Schwingungen verhindert.

Der Empfänger. Eine schematische Schaltungsskizze für die Empfangsstation nach Poulsen gibt Fig. 135.

Fig. 135.



Durch die ungedämpften Wellen werden, ebenso wie durch die gedämpften, im Empfangssystem Schwingungen erregt, deren Stärke infolge der Resonanz (zu vgl. S. 48) allmählich zunimmt. Die meisten Detektoren sprechen an, wenn die Amplitude dieser Schwingungen einen gewissen Mindestwert erreicht hat. Einige, z. B. die Fritter, verbrauchen bis zu diesem Zeitpunkte keine Energie, so daß sich die Wellen ungestört zur erforderlichen Höhe ausbilden können, andere dagegen, z. B. das Thermoelement und das Bolometer, verzehren fort-

während Strom, auch dann, wenn die Stärke der ankommenden Wellen noch nicht ausreicht, sie in Tätigkeit zu setzen. Wellenanzeiger dieser Art verzögern das Anwachsen der Wellenamplitude; unter Umständen können sie es sogar ganz verhindern.

Bei den vom Induktorfunken eingeleiteten Wellen ist die Gefahr, daß der Detektor nicht anspricht, gering, weil die ersten Schwingungen jedes Wellenzuges so hohe Spannung besitzen, daß sie auch bei vorzeitiger Energieabgabe den Detektor noch kräftig genug erregen können. Dagegen haben die vom Flammenbogen unterhaltenen ungedämpften Wellen viel geringere Spannung. Infolgedessen bedarf es bei ihnen besonderer Vorkehrungen, die verhindern, daß der empfangende Resonator die Energie vorzeitig abgibt, die vielmehr herbeiführen, daß die Energie im Resonator aufgespeichert und dem Detektor erst dann zugeführt wird, wenn die Wellenamplitude die erforderliche Höhe erreicht hat. Zu diesem Zwecke verbindet Poulsen den Detektor mit dem Empfangssystem nicht dauernd, sondern nur zeitweilig in schneller Aufeinanderfolge mittels eines elektrischen Hammer- oder eines mechanischen Zahnradunterbrechers. Während der Abschaltung geht keine Energie verloren; die Wellen wachsen daher infolge der Resonanz bald zur ausreichenden Stärke an und gelangen nunmehr zum Detektor. Die Schaltvorrichtung nennt Poulsen „Tikker".

Das System Telefunken[1]. Die Gesellschaft für drahtlose Telegraphie in Berlin erzeugt schnelle ungedämpfte Schwingungen mit Hilfe eines tönenden Lampenbogens. Indem sie als positive Elektrode Kupfer, als negative Kohle verwendet, verzichtet sie auf die Mitverwendung des Wasserstoffs oder eines Magnetfeldes. Die Kupferelektrode besteht, wie Fig. 136 zeigt, aus einem Hohlzylinder *H*, dessen Grundfläche nach innen zu gewölbt ist. Der Hohlzylinder wird zur Kühlung mit Wasser gefüllt. Der Wölbung gegenüber steht der Kohlestift *B*. Um die Energie der Schwingungen zu steigern, werden mehrere Lichtbogen hintereinander geschaltet. Da die Zahl der hintereinander geschalteten Lichtbogen durch die zulässige Gesamtspannung begrenzt ist, wäre es unmöglich, die schwingende Energiemenge nach Wunsch zu vermehren. Deswegen ist man weiter gegangen und hat solche Reihen hintereinander liegender Lampen nach Bedarf parallel geschaltet.

Fig. 136.

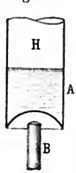
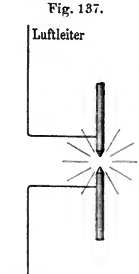


Fig. 137.



Ein wesentlicher Unterschied gegen das System Poulsen besteht darin, daß neben die Bogenlampe kein geschlossener Kondensatorkreis gelegt, sondern der offene Oszillator unmittelbar an die Lampe angeschlossen wird. Die eine Elektrode ist dabei, wie Fig. 137 andeutet, mit dem Luftleiter, die

[1]) W. Hahnemann, E. T. Z. 1906, S. 1089 bis 1091.

andere mit der Erde verbunden. Hierdurch soll das Auftreten mehrerer Wellen, wie es die Koppelung zweier Schwingungssysteme mit sich bringt, vermieden und größere Abstimmschärfe erreicht werden. Außerdem besitzt diese Anordnung fast nur beabsichtigte und nutzbringende Dämpfung, während die in dem geschlossenen Kondensatorkreise der gekoppelten Schaltung auftretenden Verluste vermieden werden.

Die Bedeutung der ungedämpften Wellen für die drahtlose Telegraphie beruht vornehmlich auf der durch sie gebotenen Möglichkeit, einen Resonator schärfer auf einen Oszillator abzustimmen, als dies mit den gedämpften Kondensatorschwingungen möglich ist. Die Einwirkung der Dämpfung auf die Resonanz erhellt aus den in Fig. 34 auf S. 46 oder in Fig. 79 auf S. 87 gegebenen Resonanzkurven. Dort ist zu sehen, wie bei geringer Dämpfung die Resonanzkurve steil ansteigt und eine scharfe Spitze bildet. Mit der Vermehrung der Dämpfung, sei es im Oszillator oder im Resonator, werden die Kurven immer flacher. Bei starker Dämpfung eines Empfängers, wie sie z. B. durch die Kurve *a* in Fig. 79 angegeben wird, kann daher die Selbstinduktion und die Kapazität und somit auch die durch die Abszissen der Kurve ausgedrückte Wellenlänge des Empfängers in verhältnismäßig weiten Grenzen geändert werden, ohne daß die durch die Ordinaten ausgedrückte, auf den Detektor wirkende Stromstärke oder Spannung sich wesentlich ändert. Eine Verstimmung des Resonators gegen den Oszillator macht sich bei starker Dämpfung daher weit weniger bemerkbar als bei geringer Dämpfung; oder, mit anderen Worten, in einem stark gedämpften Resonator rufen viele Wellen, die recht verschiedene Länge haben können, fast gleich starke Wirkungen hervor, während bei geringer Dämpfung sich nur diejenigen Wellen, welche mit der Eigenschwingung des Empfängers übereinstimmen, so kräftig ausbilden, daß sie den Wellenanzeiger in Tätigkeit setzen. So soll es mit Hilfe der ungedämpften Schwingungen gelungen sein, in demselben Bereiche gleichzeitig mit Wellen zu telegraphieren, deren Längen nur um 1 v. H. voneinander abwichen.

Ob die ungedämpften Schwingungen die gedämpften in der drahtlosen Telegraphie verdrängen können, muß abgewartet werden. Zurzeit noch bietet es große Schwierigkeiten [1]), die Beschaffenheit des Lichtbogens und mit ihr die Frequenz der Wellen konstant zu halten und ferner stößt es auf praktische Hindernisse, die Energie der ununterbrochen zu entsendenden Schwingungen auf die wünschenswerte Höhe zu bringen.

XXV. Elektrische Wellentelegraphie in bestimmter Richtung.

Von dem Orte, wo sie erzeugt werden, breiten sich die elektrischen Wellen nach allen Richtungen hin aus. Sie schreiten allerdings nicht überallhin gleichmäßig fort, denn die Beschaffenheit der Luft und des Geländes beeinflussen ihre Fortpflanzung oft wesentlich: durch Wälder oder Berge werden die Wellen aufgehalten, und trockenes Erdreich leitet sie schlechter, als feuchter Boden oder Meerwasser; Ladungen atmosphärischer Elektrizität, welche sich

[1]) Vgl. W. Hahnemann, l. c., S. 1091.

angesammelt haben, oder Verunreinigungen der Luft durch Staub sind ebenfalls imstande, die Ausbreitung der Wellen zu hindern. Überall aber, wohin die Wellen gelangen, vermögen sie Empfangsapparate, welche auf dieselbe Schwingungszahl wie sie abgestimmt sind, in Tätigkeit zu versetzen. Die von einer Station ausgesandten Nachrichten können daher gleichzeitig von vielen anderen aufgenommen werden. Innerhalb der eigenen Reichweite vermag aber auch jede Station die Korrespondenz anderer Stationen dadurch zu stören, daß sie ebenso lange Wellen entsendet, wie jene miteinander austauschen. Um solche Störungen hintanzuhalten, ist durch internationale Vereinbarungen genau vorgeschrieben worden [1]), welcher Wellenlängen sich die verschiedenen Gattungen von Stationen im gegenseitigen Verkehr zu bedienen haben. Die heimliche Aufnahme fremder Nachrichten kann auf solche Weise allerdings nicht verhindert werden.

In dem Bestreben, der Aufnahme der Nachrichten durch Unberufene vorzubeugen und eine größere Gewähr für die Geheimhaltung der Telegramme zu erreichen, ist mit mehr oder weniger Erfolg versucht worden, die Wellen in der freien Ausbreitung im Raume zu beschränken und sie nur in der Richtung auf denjenigen Empfänger zu auszusenden, für welchen sie bestimmt sind. Im folgenden sollen einige dieser Versuche kurz beschrieben werden.

1. Der Italiener Professor Alessandro Artom benutzt zirkular polarisierte Strahlen [2]). Solche Strahlen hat Professor L. Zehnder [3]) schon im Jahre 1894 erhalten. Artom erzeugt sie, indem er mehrere oszillatorische Entladungen von gleicher Frequenz mit verschiedener Phase aufeinander wirken läßt [4]). Durch zwei rechtwinklig gekreuzte Antennen werden die zirkular polarisierten Wellen in der gewünschten Richtung ausgestrahlt.

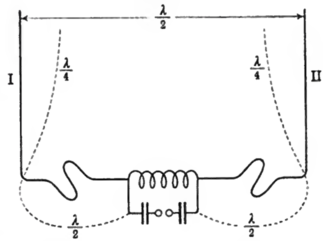
2. Etwas leichter zu übersehen ist ein anderes Verfahren von Artom, das auf folgendem Prinzip beruht: Die Sendestation erhält zwei nach Fig. 138 an denselben Schwingungskreis angeschlossene Antennen. Die Länge der Luftleiter ist so bemessen, daß sie in $^3/_4$ Wellen schwingen; ihr gegenseitiger Abstand wird gleich einer halben Welle gemacht. Dann strahlen die beiden Antennen Schwingungen aus, die um eine halbe Periode gegeneinander verschoben sind. Während nun die Antenne I eben im positiven Sinne zu schwingen anfängt, beginnt in der Antenne II die Schwingung im negativen Sinne. Bis die von I ausgehende Strahlung bei II ankommt, vergeht die Zeit einer halben Periode. Inzwischen hat die Schwingung im Luftleiter II die negative Hälfte ihrer Periode vollendet und befindet sich genau in demselben

[1]) Von der „Internationalen Konferenz für Funkentelegraphie“ durch die Ausführungs-Übereinkunft zum Berliner Vertrage, die vom 1. Juli 1908 ab in Kraft tritt. Vgl. u. a. E. T. Z. 1906, S. 1139. — [2]) Um von zirkular polarisierten Strahlen eine Vorstellung zu erhalten, ohne tiefer auf das Wesen dieser Strahlen einzugehen, vergegenwärtige man sich das Bild, wie ein geradliniger, von Gleich- oder Wechselstrom durchflossener Draht von magnetischen Wirbeln umgeben ist (vgl. S. 12), die mit dem Strome vorwärts schreiten. In ähnlicher Weise lassen sich die elektromagnetischen Schwingungen so beeinflussen, daß in einer Ebene kreisförmig zirkulierende Wirkungen erzielt werden, welche sich geradlinig weiter bewegen. Die Fortpflanzung geschieht dabei längs einer Linie, die in der Mitte der kreisförmigen Wirbelbahn senkrecht zu ihrer Ebene errichtet zu denken ist. — [3]) Bericht der naturforschenden Gesellschaft in Freiburg 1894. — [4]) Rendic. R. Accademia dei Lincei **12**, 197, 1. Sem.; **14**, 143, 1. Sem.; **15**, 692, 1. Sem.

Schwingungsstadium, wie der von I her ankommende Impuls. Aus demselben Grunde besitzen auch die von II ausgestrahlten Wellen bei ihrem Auftreffen auf den Leiter I immer dieselbe Phase, in welcher diese Antenne selbst gerade schwingt.

In der durch die Ebene der Antennen gegebenen Richtung addieren sich daher die von den beiden Sendedrähten ausgehenden Wellen und verstärken ihre Wirkungen in dieser Richtung nach beiden Seiten hin.

Fig. 138.

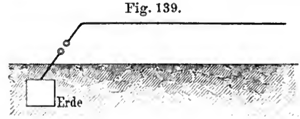


In allen zwischenliegenden Punkten, die von den beiden Luftleitern gleich weit entfernt sind, heben sich die Wellen in ihrer Wirkung auf, weil sie mit entgegengesetzter Phase zusammentreffen. Daher ist in einer mitten zwischen den Sendedrähten zu deren Verbindungsebene senkrecht stehenden Ebene keine elektrische Strahlung zu merken.

Durch die geschilderte Anordnung wird also die Energiestrahlung in einer Richtung vernichtet und in der dazu senkrecht stehenden verstärkt. In dieser, durch die Lage der Antennen bestimmten Richtung ist es am besten möglich, Telegramme zu befördern.

3. Professor Dr. F. Braun benutzt[1]), um die elektrischen Wellen in einer gewünschten Richtung auszusenden, mindestens drei Antennen. Diese werden in den Ecken *a*, *b* und *c* eines gleichseitigen Dreiecks aufgestellt. Die Luftleiter *a* und *b* werden stets gleichsinnig erregt. Die von der dritten Antenne *c* ausgehenden, in der Phase verschobenen Wellen treffen mit denjenigen von *a* und *b* stets in entgegengesetzter Phase zusammen. In der Richtung *c*—*a* und *c*—*b* kann daher nicht telegraphiert werden. Durch Hinzufügen von Antennen läßt sich die Ausbreitung der von *c* ausgestrahlten Wellen für immer mehr Richtungen unterdrücken, so daß nur ein kleiner Ausschnitt der Windrose übrig bleibt, in dem die Wellen sich frei bewegen können.

Fig. 139.



Schon mit fünf Antennen soll es möglich sein, die Wellen in eine ganz bestimmte Richtung zu lenken.

4. Bemerkenswerte Erfolge hat Marconi in der Eingrenzung der drahtlosen Zeichengebung auf eine Richtung durch die Anwendung von wagerechten Antennen erzielt[2]), die er anordnete, wie Fig. 139 zeigt.

Zwischen zwei Orten *A* und *B* führte Marconi die Versuche derart aus, daß er in *A* zur Aussendung der Wellen eine wagerechte Antenne er-

[1]) Elektrotechn. und Polytechn. Rundschau 1905, 1. November. — [2]) Proceedings of the Royal Society 77, 411, London 1906.

richtete, deren freien Draht er in der durch die Verbindungslinie beider Orte gegebenen Richtung so festlegte, daß er von B abgewendet war. Der horizontale Empfangsdraht in B ließ sich um den Endpunkt im Kreise herumdrehen wie ein Uhrzeiger und während der Aufnahme von Wellen in beliebiger Lage feststellen. Die Messung der ankommenden Energie bei den verschiedenen Stellungen ergab zwei ungleiche Maxima, die dann eintraten, wenn auch der Empfangsdraht in die Richtung $A—B$ eingestellt war. Das größere Maximum ergab sich, wenn die Antennen in A und in B voneinander abgewendet waren, also genau nach entgegengesetzten Richtungen zeigten, das kleinere, wenn die Antenne in B auf A zu gerichtet war.

Ähnliche Ergebnisse erhielt Marconi, wenn der Luftdraht einer der beiden Stationen senkrecht emporgeführt wurde.

Der Unterschied in der Stärke der ankommenden Wellen bei der günstigsten Stellung der Antennen war gegenüber den sonst möglichen Stellungen so groß, daß der Empfänger verstummte, wenn die Richtung der wagerechten Luftdrähte nur unbedeutend verändert wurde. Auf eine Entfernung von 240 km telegraphierte Marconi mit einer Sendeantenne aus vier parallelen 3 mm starken Drähten von 150 m Länge, die in gegenseitigem Abstande von 1,5 m etwa 20 m hoch horizontal geführt und über eine Funkenstrecke und eine Induktionsspule mit der Erde verbunden waren. Aufgefangen wurden die Zeichen durch einen 50 m hohen senkrechten Empfangsdraht. Sie kamen nur dann deutlich an, wenn die Richtung der wagerechten Antenne um weniger als 15° von der Verbindungslinie der beiden Stationen abwich.

Das Ergebnis dieser Versuche ist deshalb bemerkenswert, weil eine so kräftige Übertragung elektrischer Energie aus einem Oszillator, der wie hier einen fast geschlossenen Schwingungskreis bildet, auf so große Entfernungen nach den früher wiedergegebenen Anschauungen nicht zu erwarten war. Mit einem einfach auf dem Erdboden ausgestreckten isolierten Sendedraht soll Marconi Verständigung noch auf 500 km erzielt haben. Dr. A. Koepsel sagt daher bei Besprechung dieser Versuche[1]), daß sie geeignet seien, der Strahlungstheorie einen Stoß zu versetzen und die drahtlose Telegraphie in neue Bahnen zu lenken; er spricht der Erde den Hauptanteil an der Fortpflanzung der Wellen zu.

Die Ausstrahlung elektrischer Wellen aus einem Oszillator ist an sich nicht zu bezweifeln, denn die Hertzschen Versuche liefern den klaren Beweis für ihr Vorhandensein. Jedenfalls hat aber außer dieser Strahlung auch die Leitung durch die Erde große Bedeutung für die drahtlose Telegraphie.

5. Abweichend von der Anordnung Marconis hat K. E. F. Schmidt in Halle (Saale) einen vertikalen Luftdraht mit einem horizontal ausgespannten Draht als Gegengewicht kombiniert[2]). Durch eine solche Anordnung erzielte er eine Verstärkung der elektrischen Ausstrahlung in der Richtung des horizontalen Leiters. Wurde dieser wie bei den Versuchen Marconis gedreht, so ergab die Messung der Empfangsintensität nur einen Höchstwert und zwar dann, wenn der horizontale Draht auf die Empfangsstation zu gerichtet war. In der entgegengesetzten Richtung zeigte sich ein Minimum; in den Zwischenlagen rechts und links herum erhielt Schmidt allmählich ansteigende

[1]) E. T. Z. 1906, S. 752. — [2]) Physik. Zeitschr. 1907, Nr. 1.

Werte. Die Stärke der ankommenden Wellen wurde gesteigert, wenn der Horizontaldraht der Erde genähert wurde; sie war am größten, wenn außerdem der senkrechte Luftleiter unmittelbare Verbindung mit der Erde erhielt. In diesen Fällen war das Maximum der Empfangsintensität am genauesten ausgeprägt, so daß auch die Zeichengebung genauer auf eine Richtung eingegrenzt werden konnte.

XXVI. Die Wellen- oder Funkentelegraphie[1]) im öffentlichen Verkehr.

Seit dem 1. April 1905 gilt in Deutschland die nachfolgende „Vorschrift für den Gebrauch der Funkentelegraphie im öffentlichen Verkehr", deren erste Fassung vom 30. März 1905 mehrfach abgeändert worden ist[2]).

1. Allgemeines.

In dieser Vorschrift bezeichnet:

„Schiffsstation" eine Funkentelegraphenstation auf einem der Seeschifffahrt dienenden Schiffe.

„Küstenstation" eine feste Funkentelegraphenstation auf dem Festlande, auf einer Insel oder auf einem dauernd verankerten Schiffe, deren Wirkungsbereich sich auf das Meer erstreckt.

„Funkentelegramm" das mittels Funkentelegraphen übermittelte Seetelegramm.

Auf den Verkehr mit Funkentelegraphie finden die im internationalen Telegraphenvertrage nebst Ausführungsübereinkunft (Londoner Revision 1903) und der Telegraphenordnung für das Deutsche Reich enthaltenen Bestimmungen über Seetelegramme Anwendung, soweit diese Vorschrift keine Ausnahmen festsetzt.

Die Auswechslung der Funkentelegramme mit dem Reichstelegraphennetze regelt sich nach den für die Seetelegramme erlassenen Bestimmungen.

Der Text der Funkentelegramme kann in jeder der in der Londoner Ausführungsübereinkunft zum internationalen Telegraphenvertrage zugelassenen Sprachen abgefaßt werden.

In zweifelhaften Fällen liegt die Entscheidung bei der Reichstelegraphenanstalt, an welche die Funkentelegramme zur Weiterbeförderung abgegeben werden.

2. Bereich der Vorschrift.

Die Vorschrift regelt den funkentelegraphischen Verkehr zwischen den deutschen „öffentlichen Küstenstationen" und allen mit ihnen in Verkehr tretenden Funkentelegraphenstationen. Die Stationen auf Feuerschiffen verkehren in der Regel nur mit einer bestimmten Küstenstation und befördern

1. Telegramme (dienstliche und private), die von ihrer Besatzung ausgehen oder an sie gerichtet sind;

---

[1]) Die Wellentelegraphie wird auch Funkentelegraphie genannt. — [2]) Die Vorschrift ist im Amtsblatte des Reichspostamts veröffentlicht worden; im vorliegenden Abdruck wurden die bis jetzt bekannt gegebenen Abänderungen berücksichtigt.

2. Telegramme, die ihnen etwa von Schiffen auf anderem als funkentelegraphischem Wege zur Weiterbeförderung zugehen.

Mit Schiffen in See dürfen diese Stationen funkentelegraphisch nur in Fällen der Not verkehren.

Die Küstenstationen, welche „nicht öffentliche Küstenstationen“ sind (d. h. alle, die nicht unter 5 a genannt sind), haben im Verkehr mit diesen nach den für Schiffsstationen geltenden Bestimmungen dieser Vorschrift zu verfahren.

Die Vorschrift gilt ferner sinngemäß für den funkentelegraphischen Verkehr der unter deutscher Flagge fahrenden Schiffe unter sich.

3. Dienstbereitschaft der Küstenstationen.

Jede öffentliche Küstenstation der Reichsmarineverwaltung ist zu jeder Tages- und Nachtzeit betriebsbereit, sofern dieselbe nicht von der vorgesetzten Behörde aus Betriebsrücksichten oder zu Manöver- oder zu Versuchszwecken gesperrt wird.

Die öffentlichen Küstenstationen haben

die Wellenlänge von . . . . 350 $\frac{320}{380}$ m

die Reichweite (auf eine gleiche Station bezogen) von . . . . . 200 km

die Reichweite (auf ein Schiff mit 30 m hohem Maste bezogen) von 120 km

(bei normaler Witterung).

4. Verfahren.

a) Beförderungszeichen.

Abstand und Länge der Zeichen:

1. Ein Strich ist gleich drei Punkten.
2. Der Raum zwischen den Zeichen eines und desselben Buchstaben ist gleich einem Punkte.
3. Der Raum zwischen zwei Buchstaben ist gleich drei Punkten.
4. Der Raum zwischen zwei Wörtern ist gleich fünf Punkten.

Buchstaben:

a	· —	k	— · —
ä	· — · —	l	· — · ·
à oder å	· — — · —	m	— —
b	— · · ·	n	— ·
c	— · — ·	ñ	— — · — —
ch	— — — —	o	— — —
d	— · ·	ö	— — — ·
e	·	p	· — — ·
é	· · — · ·	q	— — · —
f	· · — ·	r	· — ·
g	— — ·	s	· · ·
h	· · · ·	t	—
i	· ·	u	· · —
j	· — — —	ü	· · — —

Buchstaben:

v	· · · —	y	— · — —
w	· — —	z	— — · ·
x	— · · —		

Ziffern:

1	· — — — —	6	— · · · ·
2	· · — — —	7	— — · · ·
3	· · · — —	8	— — — · ·
4	· · · · —	9	— — — — ·
5	· · · · ·	0	— — — — —

Bruchstrich — — — — — —

Bei Wiederholungen und im Kopfe des Funkentelegramms dürfen Ziffern durch folgende Zeichen gegeben werden:

1	· —	6	— · · · ·
2	· · —	7	— · · ·
3	· · · —	8	— · ·
4	· · · · —	9	— ·
5	· · · · ·	0	—

Bruchstrich — —

Unterscheidungs- und andere Zeichen:

Punkt (.) · · · · · ·
Semikolon (;) — · — · — ·
Komma (,) · — · — · —
Doppelpunkt (:) — — — · · ·
Fragezeichen oder Aufforderung zur Wiederholung einer nicht verstandenen Mitteilung (?) · · — — · ·
Ausrufungszeichen (!) — — · · — —
Apostroph (') · — — — — ·
Bindestrich (-) — · · · · —
Klammer (vor und nach den Wörtern) [()] — · — — · —
Anführungszeichen (vor und nach Wörtern oder Satzteilen, welche zwischen Anführungszeichen stehen — „ und " —) · — · · — ·
Unterstreichungszeichen (vor und hinter die zu unterstreichenden Wörter oder Satzteile zu setzen) · · — — · —
Anfangszeichen (jeder Übermittelung vorangehend) — · — · —
Doppelstrich (=) (Zeichen zur Trennung des Kopfes von der Aufschrift, der Aufschrift vom Text und des Textes von der Unterschrift) — · · · —
Verstanden · · · — ·
Irrung · · · · · · · · ·
Schluß der Übermittelung · · · — · —
Aufforderung zum Geben — · —
Warten · — · · ·
Beendete Aufnahme · — · — ·
Ruhezeichen = Bruchstrich (darf nur von öffentlichen Küstenstationen gegeben werden und von dem Schiffe, das die Flagge Seiner Majestät des Kaisers führt) — — — — — —
Notzeichen (wird von einem Schiffe in Not so lange wiederholt, bis alle anderen Stationen ihren Verkehr abgebrochen haben) · · · — — — · · ·

Suchzeichen (darf von Schiffen auf hoher See wiederholt mit ihren eigenen Namen, welche dem Zeichen folgen müssen, gegeben werden. Es ist gegebenenfalls zu beantworten durch „hier“ mit folgendem Namen) · · · — — — ·

Staatstelegramm · · · (s)

Gebührenfreies Staatstelegramm (im deutschen Verkehr) · · · · · · (ss)

Diensttelegramm · — (a)

Dringendes Privattelegramm — · · (d).

b) Reihenfolge der Beförderung.

Die Funkentelegramme werden in nachstehender Reihenfolge befördert: Staatstelegramme, Diensttelegramme, dringende Privattelegramme, nicht dringende Privattelegramme.

Die Funkentelegramme der Schiffe in Seenot haben den Vorrang vor jedem der genannten Funkentelegramme und sind mit Unterbrechung jeder anderen etwa bestehenden Verbindung zu befördern. In diesem Falle hat das hilfesuchende Schiff das Notzeichen andauernd zu geben, bis der Verkehr der anderen Stationen aufgehört hat. Folgt dem Notzeichen kein Anrufszeichen für eine bestimmte Station, so hat sich jede Station, welche dasselbe vernimmt, zu melden.

c) Anruf.

Den öffentlichen Küstenstationen liegt die Leitung des funkentelegraphischen Verkehrs mit den Schiffsstationen innerhalb ihrer Höchstreichweite ob. Ihren Anordnungen ist von den Schiffsstationen und den Küstenstationen mit beschränktem öffentlichen Verkehr (vgl. 5 b) unbedingt Folge zu leisten.

Die öffentliche Küstenstation bestimmt die Reihenfolge des Verkehrs nach folgenden Gesichtspunkten:

Vorzugsweise Behandlung erfährt dasjenige Schiff, welches nach seiner Lage, Fahrtrichtung und Geschwindigkeit die Zone der gegenseitigen Verständigung zuerst verläßt.

Eine Schiffsstation darf sich nur an die nächste öffentliche Küstenstation wenden, ausgenommen in dem Falle, daß sich eine Verständigung mit dieser wegen Betriebsschwierigkeiten nicht herstellen läßt.

Eine Schiffsstation darf nicht früher anrufen, als bis sie in die sichere Reichweite der Küstenstation gelangt ist. Diese ist etwa gleich $^3/_4$ der höchsten Reichweite der Küstenstation, bezogen auf die Schiffsstation.

Jede Schiffsstation verwendet von den ihr zur Verfügung stehenden Wellenlängen beim Anrufe diejenige, die der Wellenlänge der Küstenstation am nächsten liegt.

Jede Station muß, bevor sie ihre Anrufe beginnt, durch ihren Hörapparat oder, wenn sie keinen besitzt, durch Einstellung ihres Empfangsapparates auf höchste Empfindlichkeit feststellen, ob schon ein anderer Verkehr im Gange ist. Ist dies der Fall, so muß sie so lange mit dem Anrufe warten, bis jener beendet ist.

Alle Stationen dürfen den gegenseitigen Verkehr nur mit geringster Intensität des Gebers abwickeln.

Auf das Ruhezeichen der öffentlichen Küstenstation muß eine Schiffsstation sofort mit dem Geben aufhören und darf erst wieder fortfahren, wenn sie zum Geben aufgefordert wird.

Das Ruhezeichen darf nur von öffentlichen Küstenstationen gegeben werden und von dem Schiff, das die Flagge Seiner Majestät des Kaisers führt.

Wird der Anruf der Schiffsstation von der Küstenstation nicht beantwortet, so darf sie ihren Anruf noch dreimal in Pausen, die nicht kürzer als 5 Minuten sind, wiederholen.

Wird auch der vierte Anruf nicht beantwortet, so darf die Schiffsstation erst nach einer Pause von 1 Stunde von neuem beginnen, die Küstenstation anzurufen.

Ist auch dies ohne Erfolg, so darf das Verfahren wie beschrieben fortgesetzt werden.

Sucht eine Schiffsstation auf hoher See Verbindung mit einer anderen, so gibt sie das Suchzeichen wiederholt mit ihrem Namen, welcher dem Zeichen folgen muß.

Es ist gegebenenfalls durch „hier“ mit folgendem Namen zu beantworten.

d) Beförderung.

Die Adresse der Telegramme nach Schiffen in See muß die genaue Bezeichnung des Empfängers, der Küstenstation, die die Telegramme vermitteln soll, den Namen des Schiffes oder seine amtliche Nummer und die Nationalität des Schiffes enthalten.

Im Kopfe der von Schiffen in See herrührenden Telegramme erscheint als Aufgabeanstalt die vermittelnde Küstenstation. Dahinter wird der Name des Schiffes hinzugefügt.

Die Übermittelung der für Schiffe bestimmten Funkentelegramme findet nur statt, wenn das Schiff die Küstenstation beim Passieren anruft und solange es sich noch in ihrer Reichweite befindet.

Wenn das Schiff, für welches ein Funkentelegramm bestimmt ist, innerhalb der vom Aufgeber bezeichneten Frist oder beim Fehlen einer solchen Angabe am Morgen des 29. Tages sich nicht bei der Küstenstation gemeldet hat, gibt die Küstenstation dem Aufgeber Nachricht. Der Aufgeber hat die Befugnis, durch gebührenpflichtiges Diensttelegramm oder brieflich zu verlangen, daß die Küstenstation sein Telegramm während eines weiteren Zeitraumes von 30 Tagen zur Zustellung bereit halte usf. In Ermangelung eines solchen Verlangens wird das Telegramm am 30. Tage (Tag der Aufgabe nicht mitgerechnet) als unbestellbar zurückgelegt.

Für Funkentelegramme ist außer der gewöhnlichen Telegrammgebühr ein Seezuschlag von 80 Pfg. zu entrichten. Diese Gebühren werden stets bei dem Aufgeber bzw. Empfänger des Telegramms an Land erhoben.

Soweit zurzeit die Gebührenfrage in einzelnen Fällen anders geregelt ist, bleibt es bis auf weiteres dabei.

e) Aufnahme und Empfangsbestätigung.

Unter Beobachtung der unter 4 c ausgesprochenen Vorschriften beginnt ein Schiff den funkentelegraphischen Verkehr mit dem Anfangszeichen, dreimaligem Anruf der Küstenstation, darauffolgendem v und eigenem Rufzeichen oder, falls solches nicht festgesetzt ist, mit dem Namen.

Die Küstenstation antwortet, indem sie nacheinander das Anfangszeichen, das Rufzeichen der rufenden Station, v, ihr eigenes Rufzeichen und — · — als Aufforderung zum Geben oder das Wartezeichen (· — · · ·) gibt; im letzteren Falle ist die Minutenzahl der voraussichtlichen Wartezeit und, wenn diese 10 Minuten übersteigt, auch der Grund der verzögerten Abnahme hinzuzufügen.

Hat die Küstenstation das Wartezeichen gegeben, so muß das Schiff weiteren Anruf abwarten.

Darauf beginnt das Schiff sein Telegramm. Der Kopf des Telegramms hat die Charakterbezeichnung des Telegramms (s, ss, a, d) zu enthalten. Dann folgt der Name der Bestimmungsanstalt (Ort, wohin das Telegramm gerichtet ist), v oder de, der Name des Schiffes, die Aufgabenummer — falls das Telegramm nach dem Auslande gerichtet ist —, die Wortzahl und die Aufgabezeit des Telegramms. Diese ist mit drei Zahlen (Tag des Monats, Stunde, Minute) anzugeben.

Nach diesem Kopfe werden nacheinander die besonderen Vermerke, die Aufschrift, der Text und die Unterschrift des Telegramms übermittelt.

Der Doppelstrich (— · · · —) wird übermittelt, um den Kopf von den besonderen Vermerken, diese von der Aufschrift, diese vom Texte, diesen von der Unterschrift zu trennen.

Der Diensttuende der Empfangsstation vergleicht zunächst die Anzahl der angekündigten und erhaltenen Worte und bestätigt den Empfang, falls die Zahl stimmt und das Telegramm verstanden ist, mit dreimaligem r und folgender Aufgabenummer des Telegramms; fehlt die Aufgabenummer, so ist an ihrer Stelle der Name des Empfängers zu wiederholen. Im Eingange der Quittung ist das Rufzeichen der gebenden, am Schlusse das der empfangenden Station hinzuzufügen.

Hat er nicht alles verstanden, so nennt er das letzte Wort, bis zu dem alles verstanden wurde, und fügt ein Fragezeichen hinzu.

Darauf wiederholt der Geber das Telegramm von dem letzten richtigen Worte ab.

Der Schluß der Korrespondenz zwischen zwei Stationen wird dadurch angedeutet, daß jede derselben das Zeichen · · · — · — gibt unter Hinzufügung ihres Rufzeichens.

Beispiel für ein Funkentelegramm:

Ein Schiff, Schleppdampfer „Roland" (fingiert, mit dem Anrufzeichen drd), gibt ein Funkentelegramm an die Küstenstation Cuxhaven ab:

Anruf:	— · — · —	k c x k c x k c x v d r d
Antwort:	— · — · —	d r d v k c x — · —
Telegramm:	— · — · —	Hamburg v. Dampfer Roland 20. 15. 8 20 m — · · · — Reeder Müller Hamburg Reiherstieg 10 — · · · — Roland schleppt wracke dänische Brigg. Treffe Nachmittag 4 ein. Soll ich ans Dock gehen? — · · · — Jensen · — · — · d r d.
Quittung:	— · — · —	d r d r r r Müller k c x · — · — ·
Schluß der Korrespondenz:	· · · — · — · · · — · —	d r d k c x.

5. Anrufzeichen der deutschen Küstenstationen und der deutschen Schiffsstationen.

a) Öffentliche Küstenstationen.

Arkona	k a r
Borkum, Leuchtturm	k b m
Bülk	k b k
Cuxhaven	k c x
Helgoland	k h g
Marienleuchte	k m r
Norddeich	k n d
Ferner in den deutschen Schutzgebieten:	
Tsingtau (Signalberg)	k t s

b) Küstenstationen mit beschränktem, öffentlichem Verkehr.

Außenjade, Feuerschiff	f a u
Borkumriff, Feuerschiff	f b r
Bremerhaven, Lloydhalle	k b h
Elbe I, Feuerschiff	f e f
Weser, Feuerschiff	f w f

c) Handelsdampfer.

Bremen	(Nordd. Lloyd)	d b r
Kaiser Wilhelm der Große	(„ „)	d k w
Kaiser Wilhelm II.	(„ „)	d k m
Kronprinz Wilhelm	(„ „)	d k p
Blücher	(H. A. P. A. G.)	d d b
Deutschland	(„)	d d l
König Friedrich August	(„)	d k f
Meteor	(„)	d m r
Moltke	(„)	d d m
Cap Blanco	(H. S. A. L.)	d c b
Cap Ortegal	(„)	d c o
Cap Vilano	(„)	d c v
Prinz Adalbert	(Kiel-Korsör-Linie)	d p a
Prinz Sigismund	(„)	d p s
Prinz Waldemar	(„)	d p w
Kohlendampfer Helene Blumenfeld	(Reederei Bd. Blumenfeld, Hamburg)	d h b

d) Andere Dampfer.

Lotsendampfer Jade	j a
Kabeldampfer Großherzog von Oldenburg	d g o

Schiffe, für welche keine Anrufzeichen für den Verkehr mit deutschen Küstenstationen festgesetzt sind, haben sich mit ihrem Namen zu melden, der dann bei der Beförderung an Stelle des Anrufzeichens gebraucht wird.

Anrufzeichen für Funkentelegraphenstationen werden von der Behörde festgesetzt, welche die Erlaubnis zur Errichtung von Funkentelegraphenstationen erteilt.

ANHANG.

(Zu Seite 34.)

Ableitung der Gleichungen [46] bis [49] für die Entladung eines Kondensators.

Aus der Gleichung [45]

$$E - L\frac{dJ}{dt} - RJ = 0$$

soll der zeitliche Verlauf

I. der Spannung E an den Belegungen des Kondensators und

II. des Entladungsstromes J berechnet werden.

I.

Wir drücken J durch E aus. Nach Gleichung [31] ist der numerische Wert des Kondensatorstromes $J = C\frac{dE}{dt}$. Verstehen wir unter J den von der positiv geladenen Belegung des Kondensators ausgehenden Strom, so ist J positiv. Da aber E bei der Entladung abnimmt, ist $\frac{dE}{dt}$ und somit $C\frac{dE}{dt}$ negativ. Wir müssen daher die rechte Seite der Gleichung, damit sie ebenfalls einen positiven Wert erhält, mit (— 1) multiplizieren und haben demnach die Gleichung für den Entladungsstrom zu schreiben:

$$J = -C\frac{dE}{dt}, \qquad [1^*]$$

woraus sich durch Differentiation ergibt:

$$\frac{dJ}{dt} = -C\frac{d^2E}{dt^2} \qquad [2^*]$$

Werden diese Werte für J und $\frac{dJ}{dt}$ in die Gleichung [45] eingesetzt, so erhält man:

$$CL\frac{d^2E}{dt^2} + CR\frac{dE}{dt} + E = 0,$$

oder nach Division aller Glieder durch CL:

$$\frac{d^2E}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{dE}{dt} + \frac{E}{CL} = 0 \qquad [3^*]$$

Als Lösung sei der Wert

$$E = A e^{vt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad [4^*]$$

angenommen, worin A die Integrationskonstante und e die Basis der natürlichen Logarithmen bezeichnet.

Wenn diese Lösung die Gleichung [3*] identisch erfüllen soll, so ist der Wert von v so zu bestimmen, daß die linke Seite der Gleichung [3*] gleich Null wird, wenn die aus Gleichung [4*] abgeleiteten Differentialquotienten $\frac{dE}{dt}$ und $\frac{d^2E}{dt^2}$ eingesetzt werden.

Da

$$\frac{dE}{dt} = v A e^{vt} \text{ und } \frac{d^2E}{dt^2} = v^2 A e^{vt},$$

so ergibt sich zur Berechnung von v die Gleichung:

$$v^2 A e^{vt} + v \frac{R}{L} A e^{vt} + \frac{A e^{vt}}{CL} = 0$$

oder

$$v^2 + v \frac{R}{L} + \frac{1}{CL} = 0,$$

deren Wurzeln

$$\left.\begin{aligned} v_1 &= -\frac{R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{CL}} \\ \text{und} \quad v_2 &= -\frac{R}{2L} - \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{CL}} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad [5^*]$$

sind.

Diesen beiden Werten für v entsprechend erhalten wir zwei partikuläre Integrale mit den verschiedenen Integrationskonstanten A_1 und A_2, nämlich:

$$E = A_1 e^{v_1 t}$$

und

$$E = A_2 e^{v_2 t}.$$

Die allgemeinste Lösung der Differentialgleichung [3*] — das vollständige Integral — wird durch die Summe der partikulären Integrale dargestellt. Also:

$$E = A_1 e^{v_1 t} + A_2 e^{v_2 t} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad [6^*]$$

Die Konstanten A_1 und A_2 finden wir aus den physikalischen Grenzbedingungen, wenn wir in die Gleichungen [6*] und [1*] die bekannten Werte einführen, welche t, E und J gerade dann besitzen, wenn die Entladung des Kondensators eben beginnt; diese sind $t = 0$, $E = E_{max}$ und $J = 0$. Da $e^{vt} = 1$ wird, wenn $t = 0$ ist, so erhalten wir aus Gleichung [6*]:

$$E_{max} = A_1 + A_2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad [7^*]$$

Durch Differentiation der Gleichung [6*] ergibt sich ferner:

$$\frac{dE}{dt} = v_1 A_1 e^{v_1 t} + v_2 A_2 e^{v_2 t}.$$

Die Gleichung [1*] nimmt somit die Form an:

$$J = -C(v_1 A_1 e^{v_1 t} + v_2 A_2 e^{v_2 t}) \quad \ldots \ldots \quad [8^*]$$

Zur Zeit $t = 0$ ist daher

$$0 = -C(v_1 A_1 + v_2 A_2).$$

Da nun C nicht gleich Null werden kann, muß der Klammerausdruck gleich Null sein, also:

$$v_1 A_1 + v_2 A_2 = 0 \quad \ldots \ldots \quad [9^*]$$

Aus Gleichung [7*] wird erhalten:

$$A_1 = E_{max} - A_2$$

und aus Gleichung [8*]:

$$A_2 = -\frac{v_1 A_1}{v_2}.$$

Hieraus folgt

$$A_1 = E_{max} + \frac{v_1 A_1}{v_2}$$

oder

$$A_1 = E_{max} \frac{v_2}{v_2 - v_1}$$

und

$$A_2 = -E_{max} \frac{v_1}{v_2 - v_1} \quad \ldots \ldots \quad [10^*]$$

Die Werte von v_1 und v_2 sind reell oder imaginär, je nachdem die Differenz unter dem Wurzelzeichen in den Gleichungen [5*] positiv oder negativ ist.

Solange $\frac{R^2}{4L^2} \geqq \frac{1}{CL}$ ist, haben v_1 und v_2 reelle negative Werte und E wird, wie aus der Gleichung [6*] hervorgeht, mit wachsendem t immer kleiner, da mit negativem v die Funktion e^{vt} ständig abnimmt. Dies bedeutet: daß der Spannungsunterschied an den Kondensatorbelegungen sich allmählich vermindert, d. h. daß der Kondensator sich entlädt; das ist der Fall der kontinuierlichen oder aperiodischen Entladung.

Über den Verlauf des Entladungsstromes während einer kontinuierlichen Entladung gibt die Gleichung [8*] Aufschluß. Berechnen wir unter der Voraussetzung, daß $\frac{R^2}{4L^2} \geqq \frac{1}{CL}$ ist, v_1 und v_2 aus den Gleichungen [5*] und setzen wir das Ergebnis in die Gleichungen [10*] ein, so erhalten wir für A_1 einen positiven, für A_2 einen negativen Wert. Da v_1 und v_2 selbst beide negativ sind, dabei jedoch v_2 numerisch größer ist als v_1, geht die Gleichung [8*] unter Berücksichtigung der Vorzeichen über in

$$J = C(v_1 A_1 e^{-v_1 t} - v_2 A_2 e^{-v_2 t}).$$

Hiernach stellt sich der Klammerausdruck als die Differenz zweier abnehmenden Exponentialfunktionen dar. Ein Beispiel dafür, wie der Wert dieser Funktionen mit dem Anwachsen der veränderlichen Größe — hier der Zeit t — abnimmt, geben die Kurven I und II in Fig. 30 auf S. 42. Da nun v_2 größer als v_1 ist, so wird die Kurve, welche durch den Ausdruck $v_2 A_2 e^{-v_2 t}$ bestimmt ist, schneller abfallen, als die andere. Bildet man die

Differenz dieser beiden Kurven, indem man von den größeren Ordinaten der ersten die zu gleichen Abszissen gehörigen kleineren Ordinaten der zweiten abzieht, so ergibt sich für den Stromverlauf eine Kurvenform, die zunächst zu einem Maximum ansteigt und dann stetig abfällt, wie z. B. auch durch Subtraktion der Kurve I von II in Fig. 30 bestätigt werden kann.

Die Zeit, welche bis zur Erreichung des Maximums verstreicht, wird durch die Größen C, L und R bestimmt. Man ermittelt ihren Wert in Sekunden, wenn man aus der Gleichung [8*] den Differentialquotienten ableitet, ihn gleich Null setzt und aus der so erhaltenen Gleichung t berechnet.

Ist $\frac{R^2}{4L^2} < \frac{1}{CL}$, so wird die Differenz unter dem Wurzelzeichen in den Gleichungen [5*] negativ und damit die Wurzel imaginär. Die Ausdrücke für v_1 und v_2 werden also komplexe Größen. Wir erhalten dann:

$$\left.\begin{aligned} v_1 &= -\frac{R}{2L} + i\sqrt{\frac{1}{CL} - \frac{R^2}{4L^2}} \\ \text{und} \quad v_2 &= -\frac{R}{2L} - i\sqrt{\frac{1}{CL} - \frac{R^2}{4L^2}} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad [11^*]$$

oder, indem wir zur Vereinfachung einführen:

$$\left.\begin{aligned} \frac{R}{2L} &= \alpha \\ \text{und} \quad \sqrt{\frac{1}{CL} - \frac{R^2}{4L^2}} &= \omega \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad [12^*]$$

und

$$\left.\begin{aligned} v_1 &= -\alpha + i\omega \\ v_2 &= -\alpha - i\omega \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad [13^*]$$

Werden diese Ausdrücke in die Gleichung [6*] eingesetzt, so ergibt sich:

$$\begin{aligned} E &= A_1 e^{(-\alpha + i\omega)t} + A_2 e^{(-\alpha - i\omega)t} \\ &= e^{-\alpha t}(A_1 e^{i\omega t} + A_2 e^{-i\omega t}) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad [14^*] \end{aligned}$$

Es ist aber (Moivrescher Satz):

$$e^{i\omega t} = \cos\omega t + i \sin\omega t$$

und

$$e^{-i\omega t} = \cos\omega t - i \sin\omega t,$$

folglich

$$\begin{aligned} E &= e^{-\alpha t}[A_1(\cos\omega t + i\sin\omega t) + A_2(\cos\omega t - i\sin\omega t)] \\ &= e^{-\alpha t}[(A_1 + A_2)\cos\omega t + i(A_1 - A_2)\sin\omega t] \quad \ldots \quad [15^*] \end{aligned}$$

Die Summe $A_1 + A_2$ ist aus Gleichung [7*] bekannt.

Aus den Gleichungen [10*] folgt:

$$\begin{aligned} A_1 - A_2 &= E_{max}\left(\frac{v_2}{v_2 - v_1} + \frac{v_1}{v_2 - v_1}\right) \\ &= E_{max}\frac{v_2 + v_1}{v_2 - v_1} \end{aligned}$$

und, wenn wir die Ausdrücke für v_1 und v_2 aus den Gleichungen [13*] einführen:

$$A_1 - A_2 = E_{max} \frac{\alpha}{i\omega}.$$

Setzen wir die Werte für $A_1 + A_2$ und $A_1 - A_2$ in die Gleichung [15*] ein, so erhalten wir:

$$E = e^{-\alpha t}\left(E_{max} \cos \omega t + E_{max} \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t\right)$$

$$= E_{max} e^{-\alpha t}\left(\cos \omega t + \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t\right) \quad \ldots \ldots \ldots \quad [16^*]$$

Von den Größen auf der rechten Seite dieser Gleichung sind E_{max}, e, α und ω konstant. Veränderlich ist nur die Größe t. Die Gleichung [16*] gestattet daher, die Augenblickswerte der Spannung für jede beliebige Zeit t zu bestimmen und so den zeitlichen Verlauf der Kondensatorspannung zu verfolgen.

Die Gleichung [46] auf S. 34, nach welcher dieser Vorgang leichter zu übersehen ist, wird aus der Gleichung [16*] in folgender Weise erhalten:

Um den Klammerausdruck $\cos \omega t + \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t$ zu vereinfachen, wird der Faktor $\frac{\alpha}{\omega}$ durch eine passende Winkelfunktion ersetzt, indem wir einen Winkel φ so bestimmen, daß

$$tg\, \varphi = \frac{\omega}{\alpha} \quad \ldots \ldots \ldots \quad [17^*]$$

Dann ist $\frac{\alpha}{\omega} = \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi}$. Hiermit erhält die Gleichung [16*] die Form:

$$E = E_{max} e^{-\alpha t}\left(\cos \omega t + \frac{\sin \omega t \cos \varphi}{\sin \varphi}\right)$$

$$= \frac{E_{max} e^{-\alpha t}}{\sin \varphi} (\cos \omega t \sin \varphi + \sin \omega t \cos \varphi)$$

$$= \frac{E_{max} e^{-\alpha t}}{\sin \varphi} \sin(\omega t + \varphi) \quad \ldots \ldots \ldots \quad [18^*]$$

Der Spannungsverlauf ist hiernach durch das Produkt aus einer abnehmenden Exponentialfunktion und einer Sinusfunktion bestimmt, d. h. die Spannung nimmt den Verlauf einer gedämpften Sinusfunktion.

Die Gleichung [18*] geht in die Gleichung [46] auf S. 34 über, wenn $\varphi = 90^0$ wird, denn dann ist $\sin(\omega t + \varphi) = \cos \omega t$ und $\sin \varphi = 1$.

Um zu prüfen, ob $\varphi = 90^0$ gesetzt werden kann, bestimmen wir $\sin \varphi$ durch folgende Rechnung:

Die bekannte trigonometrische Formel $\sin \varphi = \frac{tg\, \varphi}{\sqrt{1 + tg^2 \varphi}}$ geht mit dem Ausdruck für $tg\, \varphi$ aus Gleichung [17*] über in:

$$\sin \varphi = \frac{\frac{\omega}{\alpha}}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2}{\alpha^2}}}$$

$$= \frac{\omega}{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}}.$$

Hieraus folgt mit den Werten aus den Gleichungen [12*]:

$$\sin\varphi = \frac{\sqrt{\frac{1}{CL} - \frac{R^2}{4L^2}}}{\sqrt{\frac{R^2}{4L^2} + \frac{1}{CL} - \frac{R^2}{4L^2}}}$$

$$= \sqrt{1 - \frac{R^2 C}{4L}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad [19^*]$$

Soll $\varphi = 90^0$ werden, also $\sin\varphi = 1$ sein, so müßte der Ausdruck $\frac{R^2 C}{4L}$ unter dem Wurzelzeichen den Wert Null annehmen. Das ist allerdings nicht möglich, weil weder R oder C unendlich klein, noch L unendlich groß werden kann, wohl aber kann, wie ein der Praxis entnommenes Beispiel zeigen möge, der Wert von $\frac{R^2 C}{4L}$ so klein werden, daß es nur ein geringfügiger Fehler ist, der vernachlässigt werden darf, wenn $\varphi = 90^0$ gesetzt wird.

Für einen Schwingungskreis, wie er in der elektrischen Wellentelegraphie vorkommt, dessen

Selbstinduktion $L = 10^{-5}$ Henry,
Kapazität $C = 10^{-9}$ Farad und
Widerstand $R = 2$ Ohm [1])

sein mag, ist

$$\frac{R^2 C}{4L} = \frac{4.10^{-9}}{4.10^{-5}} = 10^{-4}$$

und

$$\sin\varphi = \sqrt{1 - 0{,}0001} \sim 1,$$

daher

$$\varphi \sim 90^0.$$

Da nun in der Technik der elektrischen Wellentelegraphie stets mit Schwingungskreisen gearbeitet wird, in denen $R^2 C$ gegen $4L$ sehr klein ist, darf in den einschlägigen Rechnungen $\varphi = 90^0$ gesetzt werden. Dann erhält, da $\sin(\omega t + 90^0) = \cos\omega t$, die Gleichung [18*] die Form

$$E = E_{max}\, e^{-\alpha t} \cos\omega t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad [20^*]$$

Wie in Gleichung [18*] kommt auch hier zum Ausdruck, daß E eine gedämpfte Wechselspannung ist. Von den Faktoren der rechten Seite bestimmt der erste die Amplitude und der zweite die Dämpfung; der dritte, nämlich $\cos\omega t$, kennzeichnet den periodischen Verlauf. Dieser Faktor erhält seinen Erstwert Null, den er hatte, als $t = 0$ war, zum ersten Male wieder, wenn $\omega t = 2\pi$. Dann ist die erste Periode vollendet. Bezeichnen wir die Dauer der Periode mit T, so wird $\omega T = 2\pi$, sobald t zu T angewachsen ist. Bedeutet ferner, wie auf S. 7, ν die Anzahl der Perioden in einer Sekunde, so ist:

$$\omega T = \frac{\omega}{\nu} = 2\pi \quad \text{oder} \quad \omega = 2\pi\nu.$$

Setzen wir diesen Ausdruck für ω in die Gleichung [20*] ein, so erhalten wir die Gleichung [46].

[1]) Wir haben auf S. 39 die Periodenzahl dieses Schwingungskreises auf 1600000 bestimmt.

II.

Um den Verlauf des Entladungsstromes zu finden, gehen wir wieder, wie zu I, aus von der Gleichung [1*]:

$$J = -C\frac{dE}{dt}.$$

Wir leiten aus der Gleichung [16*] durch Differentiation ab:

$$\frac{dE}{dt} = E_{max}\left\{-\alpha e^{-\alpha t}\left(\cos\omega t + \frac{\alpha}{\omega}\sin\omega t\right) + e^{-\alpha t}(-\omega\sin\omega t + \alpha\cos\omega t)\right\}$$

und erhalten:

$$J = -CE_{max}\left\{-\alpha e^{-\alpha t}\left(\cos\omega t + \frac{\alpha}{\omega}\sin\omega t\right) + e^{-\alpha t}(-\omega\sin\omega t + \alpha\cos\omega t)\right\}$$

$$= +CE_{max}e^{-\alpha t}\left\{\alpha\cos\omega t + \frac{\alpha^2}{\omega}\sin\omega t - \alpha\cos\omega t + \omega\sin\omega t\right\}$$

$$= +CE_{max}e^{-\alpha t}\frac{\alpha^2+\omega^2}{\omega}\sin\omega t,$$

also nach den Gleichungen [12*]:

$$= +CE_{max}e^{-\alpha t}\frac{\frac{R^2}{4L^2} + \frac{1}{CL} - \frac{R^2}{4L^2}}{\omega}\sin\omega t$$

$$= +\frac{E_{max}}{\omega L}e^{-\alpha t}\sin\omega t.$$

Wird schließlich auch hier der Wert $2\pi\nu$ für ω eingeführt, so ergibt sich die Gleichung [47].

Die beiden Gleichungen [12*] sind mit den Gleichungen [48] und [49] identisch.

ALPHABETISCHES NAMEN- UND SACHREGISTER.

Berichtigung.

Auf Seite 95, Zeile 2 von unten, muß es heißen: Traubenberg statt Frankenberg.